Liebe Leserinnen, liebe Leser!



Reinhard Breuer
Chefredakteur

Eben dachte ich noch, ich hätte mich aus völlig freien Stücken dazu entschlossen, für Sie dieses Editorial zu schreiben. Doch nach Lektüre unseres Interviews mit dem Max-Planck-Forscher Wolf Singer auf Seite 72 bin ich mir da nicht mehr so sicher. Unser persönlicher freier Wille ist in den Augen des Frankfurter Hirnforschers „ein kulturelles Konstrukt“. Die Spektrum-Redakteure Inge Hoefer und Christoph Pöppe fragten, ob es denn sein freier Wille sei, uns dieses Interview zu geben? Konsequent antwortete Wolf Singer: „Ich fürchte nein.“ Schon in früher Kindheit – so früh, dass wir uns daran nicht mehr erinnern können – würden wir das Konzept eines freien, autonomen Selbst erst entwickeln.

Und zwar dank der Fähigkeit unseres Gehirns, sich in andere hineinzuversetzen – etwas, das uns von den meisten Tieren unterscheidet. Mich erinnert das an Einsteins Diktum über das Verfließen der Zeit, hier gemünzt auf den freien Willen: Es handelt sich zwar um eine Illusion, jedoch eine äußerst hartnäckige.

Im Zeitalter von BSE-Epidemie und Creutzfeldt-Jakob-Erkrankungen sehen sich viele genötigt, ihre bisherigen Essgewohnheiten zu ändern. Zum Glück hatte ich meinen Fleischkonsum in den letzten Jahren ohnehin schon reduziert. Dass vieles, was heute auf unseren Tisch kommt, auf das 17. Jahrhundert zurückgeht, habe ich erst jetzt erfahren. Damals wandelte sich die mittelalterliche Alchimie zur moderneren, aber immer noch vorwissenschaftlichen Chemie. Sie verdrängte die aus der Antike stammenden, zum Teil noch magischen Vorstellungen über Ernährung. Unter diesem Einfluss stellte die feudale Oberschicht ihre Essgewohnheiten um. Alsbald wurden Mehlschwitzen und Fonds angerührt, wurden Salate, Saucen und süße Desserts serviert. Viele dieser neuen Gerichte und Zubereitungsarten blieben bis heute erhalten – obwohl dahinter eine weitgehend überholte Ernährungstheorie steckt (Seite 66).

Salat, angemacht mit Essig und Öl

Eine neue Serie und eine neue Rubrik werden Sie vielleicht schon bemerkt haben: Bereits in 5. Folge stellen wir Ihnen „Das Protein des Monats“ vor. Es vermittelt Einblicke in das brandaktuelle Gebiet der „Proteomik“, das die Ergebnisse der Humangenom-Forschung vielfältig nutzbar macht. Diesmal präsentiert unser Kolumnist Michael Groß das „Rhodopsin“, das beim Sehprozess im Auge eine zentrale Rolle spielt (Seite 23). Die „Mathematischen Unterhaltungen“ haben, im Monatswechsel, eine Schwesterrubrik erhalten: „Physikalische Unterhaltungen“. Der Physikprofessor Wolfgang Bürger zeigt Ihnen, wie bestimmte Rätsel des Alltags funktionieren, so der „Wirbel in der Badewanne“ (im Januar-Heft) oder die „Lichtmühle“ auf Seite 104.

Herzlich Ihr

Reinhard Breuer

TITELBILD:

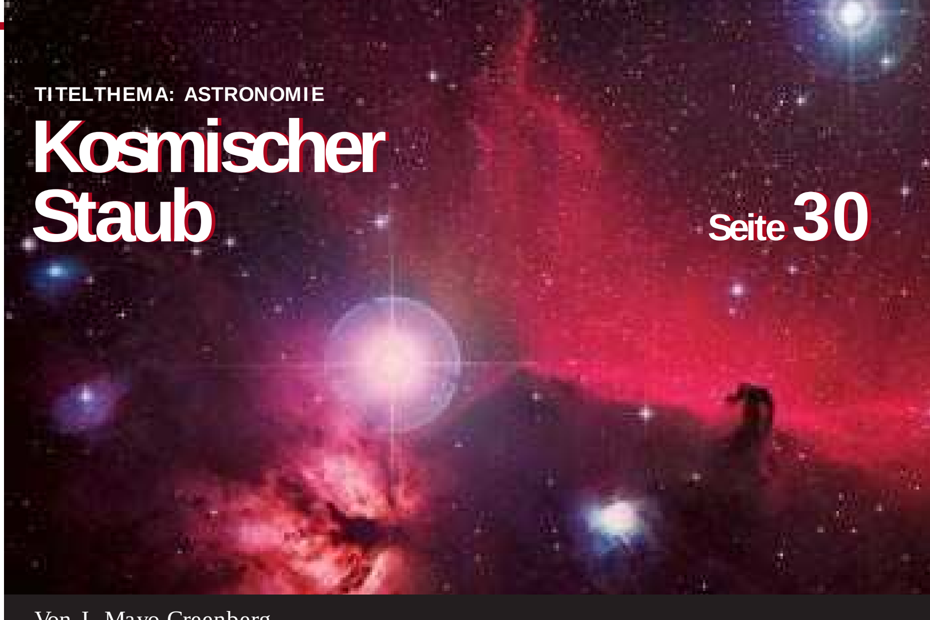
Geisterhaft reflektiert eine pechschwarze Wolke aus Staub und Gas das Licht eines der hellsten Sterne im Plejaden-Sernhaufen. Bekannt als „Barnards Merope-Nebel“ IC 249, wurde die Wolke bei einer Kollision mit dem Stern zerrissen. Die Lichtstrahlen links oben entstanden erst im Hubble-Teleskop, mit dem diese Aufnahme gelang.

Foto: NASA und The Hubble Heritage Team (STScI/Aura)

MONATSSPEKTRUM

SPEKTROGRAMM

HAUPTARTIKEL



TITELTHEMA: ASTRONOMIE

Kosmischer Staub

Seite 30

Von J. Mayo Greenberg

Die Abfallprodukte von Sternexplosionen, winzige Staubkörner im interstellaren Raum, haben die Geschichte unserer Galaxis entscheidend beeinflusst.

PHYSIOLOGIE

Molekulare Muskelmaschinen

Seite 36

Von Stefan Galler

Gewichte heben, Lasten halten und Bälle werfen – ohne unterschiedliche Fasertypen in unseren Muskeln wären die vielfältigen Anforderungen nicht zu bewältigen.



ARCHÄOLOGIE

Wer waren die ersten Amerikaner?

Seite 42

Von Sasha Nemecek

Es galt als sicher: Jäger folgten Mammutherden vor 13000 Jahren von Sibirien über die Bering-Landbrücke nach Amerika. Neuere archäologische Funde deklassieren dieses Standardmodell aber als eines unter mehreren. Jagten die ersten Amerikaner Fische statt Mammuts?

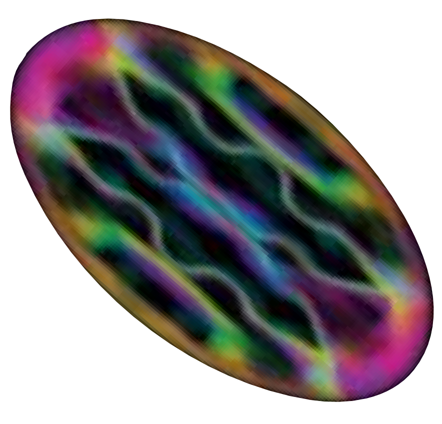
QUANTENPHYSIK

Das kälteste Gas im Universum

Seite 50

Von Graham P. Collins

Seit kurzem gelingt es, winzige Gaswölkchen knapp über dem absoluten Nullpunkt in einen kollektiven Quantenzustand zu versetzen. Solche Bose-Einstein-Kondensate werden nun intensiv erforscht und auf mögliche Anwendungen untersucht.



COMPUTERGRAFIK

Computer-Pflanzen

Seite 58

Von Oliver Deussen und Bernd Lintermann

Moderne Algorithmen der Computergrafik ermöglichen die Herstellung realistisch wirkender Naturszenen. Damit eröffnen sich neue Anwendungen in der Visualisierung ökologischer Daten sowie eine neue Qualität virtueller Welten in Simulatoren und auch Computerspielen.



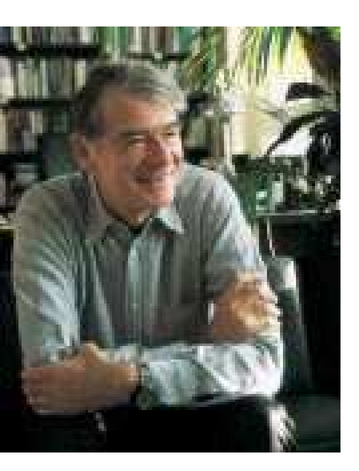
ERNÄHRUNG

Der Ursprung der modernen Küche

Seite 66

Von Rachel Laudan

Süßspeisen werden nach dem Hauptgericht serviert – warum eigentlich? Die Antwort liegt in revolutionären medizinischen Konzepten des 17. Jahrhunderts, die von der damals aufkommenden Chemie geprägt waren. Obwohl vorwissenschaftlich, bestimmen sie unsere Essgewohnheit bis heute.



INTERVIEW

Das Ende des freien Willens?

Seite 72

Mit Wolf Singer

Neue Erkenntnisse der Hirnforschung verändern unser Bild vom Menschen. Prof. Dr. Wolf Singer, Direktor am Max-Planck-Institut für Hirnforschung, äußert sich über Bewusstsein, die Grenzen des freien Willens und die Folgen für unser Rechtssystem und Erziehungswesen.

Technoskop-Magazin

Optronik: Lichtschalter für Glasfasernetze

Seite 76

Netzknoten sind der Flaschenhals der schnellen Kommunikationsleitungen, denn die Vermittlung von Signalen erfolgt bislang elektrisch.

Außerdem:
Kunststoffe, die verrotten können und doch haltbar sind; Laufschuhdesigner hören auf Biomechaniker

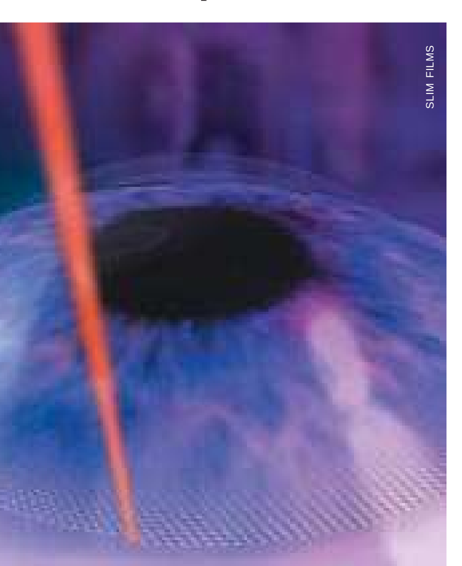
Technogramm:
Preiswerte Hochbahn • Sprengprägen • Flugsicherheit



Ultrakurze Laserblitze
November 2000

Präzise Messerschnitte
LASIK hat sich in den USA zum Standardverfahren in der refraktiven Chirurgie entwickelt. Ein ähnlicher Trend ist in Europa zu verzeichnen. Die Aussage, dass der herkömmliche Schnitt der Hornhautkappe mit einem Skalpell „ein riskantes Verfahren ist, das raue Schnitte erzeugt“, ist verunsichernd und irreführend. Tatsache ist, dass seit Jahren mit Mikrokeratomen (den Skalpellen) Schnitte im klinischen Betrieb sicher durchgeführt werden. Selbst Mikrokeratome einfacher Bauart erzeugen keine rauen Schnitte. Aus beugungsoptischen Gründen wird die Präzision des Schnittes (Lochmuster) eines Femtolasers von seinem Fokus begrenzt. Im nahen Infrarot beträgt z. B. der Durchmesser der geschossenen Löcher typischerweise drei bis fünf Mikrometer (ca. das Doppelte in der Höhe). Ein gutes Mikrokeratom mit einer hochwertigen Messerführung erreicht diese Präzision leicht. Wie präzise mit Messern geschnitten werden kann, beweisen auch Mikro- und Ultratome; Schnittdicken unter 100 Nanometern in unterschiedlichen Materialien sind Stand der Technik. Diese Präzision wird mit Femtolasern beschriebener Bauart auf Grund der verwendeten Wellenlängen nicht erreichbar sein. Wichtiger für den Patienten dürften allerdings andere Kriterien wie z. B. kurze Eingriffszeiten sein: Zur Zeit schneiden Mikrokeratome zehnmal schneller als ein scannender Laser.

sis ltd., Frank Ziemer, Biel, Schweiz


SLIM FILMS

Ultrakurze Laserpulse lösen Augenhornhaut ab.

Unsichtbare Wunden – September 2000

Wie lange dauern psychische Kriegsschäden?
In zwei außerklinischen Therapiegruppen mit je zehn Patienten, die alle aus Flüchtlings- oder sonstwie durch den 2. Weltkrieg entwurzelten deutschen Familien stammten, definierten sich alle trotz unterschiedlicher Einzelproblematik über Leistung und beklagten sich über eine lieblose Familie. Die Einzelleistungsfähigkeit der Patienten war während des Krankheitsverlaufs stark schwankend geworden. Die Krankheitssymptome betrafen bis zu drei Generationen.

Wenn statistisch betrachtet in den alten Bundesländern ungefähr 15 Prozent der Bevölkerung psychische Beschädigungen aufweist und therapiert werden sollte, könnte eventuell ein namhafter Teil davon auf Nachwirkungen des 2. Weltkrieges zurückzuführen sein. Die Untersuchung dieses Aspekts ist bei statistischer Auswertung der vorhandenen Anamnesen recht leicht. Angesichts der Generationenentwicklung könnte vielleicht festgestellt werden, wie lange eine Bevölkerung zur Assimilation der psychischen Kriegsschäden braucht.

Wolfram Stratmann, Retzow

Darwins Einfluss auf das moderne Weltbild
September 2000

G. ALDANA, J. PAUL GETTY TRUST

Die Praxis spricht für Rückschritt
Im Artikel wird behauptet, dass Darwin eine naturwissenschaftliche Basis für die Ethik geliefert haben solle. Wenn dem so wäre, müsste eine Fortentwicklung der menschlichen Gesellschaft zum Positiven hin doch gerade heute, wo nach Aussage von Herrn Mayr unsere wissenschaftliche Denkweise von der Evolutionstheorie wesentlich geprägt sein soll, beobachtbar sein. Die Praxis spricht eher für das Gegenteil – große Teile der Menschheit stehen mehr denn je am Abgrund. Auch jüngere Spektrum-Artikel (z. B. Kleinwaffen – eine mörderische Weltplage (8/2000), Kindersoldaten (10/2000) belegen deutlich, dass es mit dem vernunftgemäßen Denken und dem das Überleben und Wohl der Gemeinschaft fördernden Altruismus bei der menschlichen Spezies nicht weit her sein kann.

Martin Zierau, Pansdorf

In kleinen Schritten oder gewaltigen Sprüngen?
Bei Mayrs Aussage „Kein gebildeter Mensch wird die Evolutionstheorie anzweifeln“ fange ich an, fast sprachlos zu werden. Seit wann ist der Glaube an die Evolutionstheorie Maßstab für den Bildungsgrad des Einzelnen? Wie verträgt sich dies mit der im Heft 11/99 („Naturwissenschaft und Religion in Amerika“) vorgestellten Erhebung, wonach 40 Prozent der amerikanischen Naturwissenschaftler an Gott glauben. Es muss festgestellt werden, dass doch eine nicht unerhebliche Anzahl von gebildeten Menschen den Glauben an eine dem Menschen übergeordnete Transzendenz teilen.

Widersprechen muss ich auch Mayrs Argumentation, es habe sich die Ansicht bestätigt, dass die Evolution der Lebewesen sich in kleinen Schritten vollzogen hätte. Der Fossilbericht legt nahe, dass die Entstehung der Arten – wenn sie sich denn ohne externen Anstoß „entwickelt“ haben – eben nicht in kleinen Schritten, sondern in gewaltigen Sprüngen abgelaufen sein muss. Bis heute fehlen sämtliche Bindeglieder, die die Ansicht eines graduellen Verlaufs stützen müssten.

Daniel Körtel, Kassel

Diskussion um Determinismus
Im Rahmen seines (späteren) Weltbildes vertrat Einstein einen über rein physikalische Sachverhalte weit hinausgehenden Determinismus. In seinen späteren Jahren war er Spinozist. Dazu bekennt er sich verschiedentlich selbst. Der Determinismus der Philosophie des Spinoza und Einsteins schließt auch den menschlichen Willen nicht aus.

Dr. Cornelia Liesenfeld, Augsburg

Durchs arktische Eis zum Alpha-Rücken
November 2000

Der nautische Knoten
Im nautischen Gebrauch ist Knoten die Einheit der Geschwindigkeit und bezeichnet Seemeilen (1852 Meter) pro Stunde. Gemeint war in dem Artikel wohl, dass am 10./11.7. eine Strecke von 6,5 Seemeilen zurückgelegt wurde.

Dr. Jörg Peter Ewald, Landau

Die Suche nach außerirdischem Leben
November 2000

Reisedauer: 300 Jahre
Die Kolonisierung der Galaxis wäre weitaus komplizierter als in den Artikeln dargestellt. Angenommen, ein Generationenraumschiff mit einer Mindestbesatzung von 200 Personen würde mit einem Zehntel der Lichtgeschwindigkeit einen 30 Lichtjahre entfernten Stern ansteuern: Die Reise dauerte dann 300 Jahre, rund zehn Generationen. Die Gesamtmasse des Raumschiffs müsste rund 100 000 Tonnen betragen. Zum Beschleunigen und Abbremsen des Raumschiffs wäre eine Energie von insgesamt 2,5 x 10^{16} Kilowattstunden erforderlich – das 200fache der Energie, welche die ganze Erdbevölkerung in einem Jahr verbraucht (1998: 1,1 x 10^{14} Kilowattstunden).

Dr. Sebastian von Hoerner, Esslingen

Briefe an die Redaktion ...

... richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 104840
69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com
Fax: (0 62 21) 504-716

Rücksichtslose Völker technisch am stärksten
Die Erde ist nur 0,0002 % ihrer bewohnten Zeit von zivilisatorisch begabten Wesen besiedelt, die 3,5 Milliarden Jahre benötigten, um sich zu entwickeln. Hätte man die Erde vor 100 Jahren aus dem Weltall abgehorcht, wäre Funkstille gewesen. Es ist nicht nur der evolutionäre Schritt von Ein- zu Mehrzellern zu beachten, es sind auch evolutionäre Schritte einzubeziehen, die Empfindung, Bewusstsein, Kommunikation, Technik entstehen ließen. Merkwürdigerweise ist technische Entwicklung ausgerechnet bei den kriegerischsten, aggressivsten und rücksichtslosen Völkern am stärksten.

Hans-Jörg Teubner, Hamburg

Mimikry-Strategie
Das Fermi-Paradoxon beruht vermutlich auf einer Mimikry-Strategie. Warum sollen Außerirdische durch unvorsichtig ausgesandte Signale unnötige Risiken eingehen? Da sie nicht wissen können, welchem potenziellen Aggressor/Kolonisator sie damit Informationen über einen lebenstauglichen Planeten geben, ist die beste Strategie, sich und ihre Kommunikationssignale zu tarnen. Dieses Prinzip hat sich – bei aller Vielfalt in der Evolution der irdischen Fauna – überall als erfolgreiche Strategie durchgesetzt, sowohl bei Jägern wie bei Beutetieren. Beide wollen nicht entdeckt werden und erhöhen so ihre Überlebenschance. Das Prinzip Auffälligkeit gibt es nur bei Tieren, die entweder ungenießbar oder gefährlich sind, in eine Falle locken wollen oder Imponiergehabe zeigen.

Prof. Max J. Kobbert, Münster

Energieproblem setzt Grenzen
Wenn es heißt, dass das Milchstraßensystem von außerirdischen Zivilisationen nur so wimmeln sollte, dass sie sich aber paradoxerweise bisher nicht bemerkbar gemacht haben, so wird meines Erachtens ein wesentlicher Sachverhalt zu wenig berücksichtigt: nämlich das Energieproblem und die daraus möglicherweise resultierende sehr begrenzte Lebensdauer interstellar kommunikationsfähiger Zivilisationen. Ich erwarte, dass unsere technische Zivilisation nach der bevorstehenden Erschöpfung fossiler Energieträger auf einen neuen „post-fossilen“ Zustand kollabieren wird, der durch allgemeinen Energiemangel und stark veränderte Lebensgrundlagen gekennzeichnet sein wird.

Nimmt man aber an, dass die Zeitspanne interstellarer Kommunikationsfähigkeit nur wenige hundert Jahre beträgt, so verliert das Fermi-Paradoxon an Gewicht: Es mag in unserer rund 10 Milliarden Jahre alten Galaxis durchaus Millionen technischer Zivilisationen gegeben haben und auch zukünftig noch geben – aber wohl keine gleichzeitig mit uns.

Prof. em. Werner Oldekop, Braunschweig


NASA UND SPACE TELESCOPE SCIENCE INSTITUTE

Sterbender Stern: Starb mit ihm auch Leben?

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke, E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann
Layout: Sibylle Franz, Andreas Merkert, Natalie Schäfer, Karsten Kramarczik (Artwork Coordinator)
Online-Redaktion: Antje Findeklee, Elke Reinecke, Christoph Roloff,E-Mail: online@spektrum.com
Redaktionsassistenz: Cornelia Schenck, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 104840, 69038 Heidelberg Tel. (0 62 21) 504-711, Fax (0 62 21) 504-716
Büro Bonn: G. Hartmut Altenmüller, Tel. (0 22 44) 43 03, Fax (0 22 44) 63 83, E-Mail: GHALT@aol.com
Korrespondenten: Dieter Beste, Marion Kälke, Tel. (02 11) 908 3357, Fax (02 11) 908 33 58, E-Mail: Dieter.Beste@t-online.de
Produktion: Klaus Mohr, Tel. (0 62 21) 504-730
Marketing und Vertrieb: Annette Baumbusch, Markus Bossle Tel. (0 62 21) 504-741/742, E-Mail: marketing@spektrum.com
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Johannes Classen, PD Dr. Udo Gansloßer, Dr. Hilde Fischer, Andrea Jungbauer, Dr. Rainer Riemann, Peter Schütz.
Verlag: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Vangerowstraße 20, 69115 Heidelberg Tel. (0 62 21) 504-60, Fax (0 62 21) 504-751.
Geschäftsführer: Dean Sanderson
Leser-Service: Marianne Blume; Tel. (0 62 21) 504-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Boschstraße 12, 69469 Weinheim, Tel. (0 62 01) 60 61 50, Fax (0 62 01) 60 61 94
Bezugspreise: Einzelheft DM 12,90/sfr 12,90/öS 98,–; im Abonnement DM 142,20 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) DM 123,60. Die Preise beinhalten DM 10,80 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen DM 10,20 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 10); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung: Andreas Formen Anzeigenleitung: Holger Grossmann, Tel. (06221) 504-748, Fax -758 Verkaufsberatung: Sabine Ebert, (06221) 504-749, Fax -758; verantwortlich für Anzeigen: Gabriele Reichard Kasernenstraße 67, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 887-2341/93, Fax (02 11) 37 49 55
Anzeigenvertretung: Berlin-West: Rainer W. Stengel, Lebuser Str. 13, 10243 Berlin, Tel. (0 30) 7 74 45 16, Fax (0 30) 7 74 66 75; Berlin-Ost: Gunter-E. Hackemesser, Friedrichstraße 150–152, 10117 Berlin, Tel. (030) 6 16 86-150, Fax (0 30) 6 15 90 05, Telex 114810; Hamburg: Michael Scheible, Stefan Irmler, Burchardstraße 17, 20095 Hamburg, Tel. (0 40) 30 18 31 84, Fax (0 40) 33 90 90; Hannover: Egon F. Naber, Sextrostraße 3-5, 30169 Hannover, Tel. (05 11) 9 88 47 14, Fax (05 11) 8 09 11 23; Düsseldorf: Cornelia Koch, Werner Beyer, Herbert Piehl, Klaus-P. Barth, Zollhof 30, 40221 Düsseldorf, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 30 135-20 57, Fax (02 11) 13 39 74; Frankfurt: Anette Kullmann, Dirk Schaeffer, Markus Horn, Holger Schlitter, Große Eschenheimer Straße 16-18, 60313 Frankfurt am Main, Tel. (0 69) 92 01 92 82, Fax (0 69) 92 01 92 82; Stuttgart: Erwin H. Schäfer, Norbert Niederhof, Königstraße 20, 70173 Stuttgart, Tel. (0711) 22 475 40, Fax (07 11) 22 475 49; München: Reinold Kassel, Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15, 80331 München, Tel. (0 89) 54 59 07-12, Fax (0 89) 54 59 07-16
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf Tel. (02 11) 8 87-23 84, Fax (02 11) 37 49 55
Anzeigenpreise: Zur Zeit gilt die Anzeigenpreisliste Nr. 22 vom 1. Januar 2001.
Gesamtherstellung: VOD – Vereinigte Offsetdruckereien GmbH, D-69214 Eppelheim

ISSN 0170-2971

Ein Teil unserer Auflage enthält Beilagen von VNR Verlag, Bonn und VDI-Nachrichten, Düsseldorf. Wir bitten unsere Leser um Beachtung.

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 100017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Sandra Ourusoff, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman Emeritus: John J. Hanley, Chairman: Rolf Grisebach, President and Chief Executive Officer: Gretchen Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg; Vice President, Technology: Richard Sasso

PLATTENTEKTONIK

Wenn Tiefseeberge das Festland rammen

Vor der Pazifikküste Costa Ricas ließ sich mit geophysikalischen Methoden erstmals direkt zeigen, wie eine ozeanische Platte beim Abtauchen unter einen Kontinentalrand Material von dessen Unterseite abschabt.

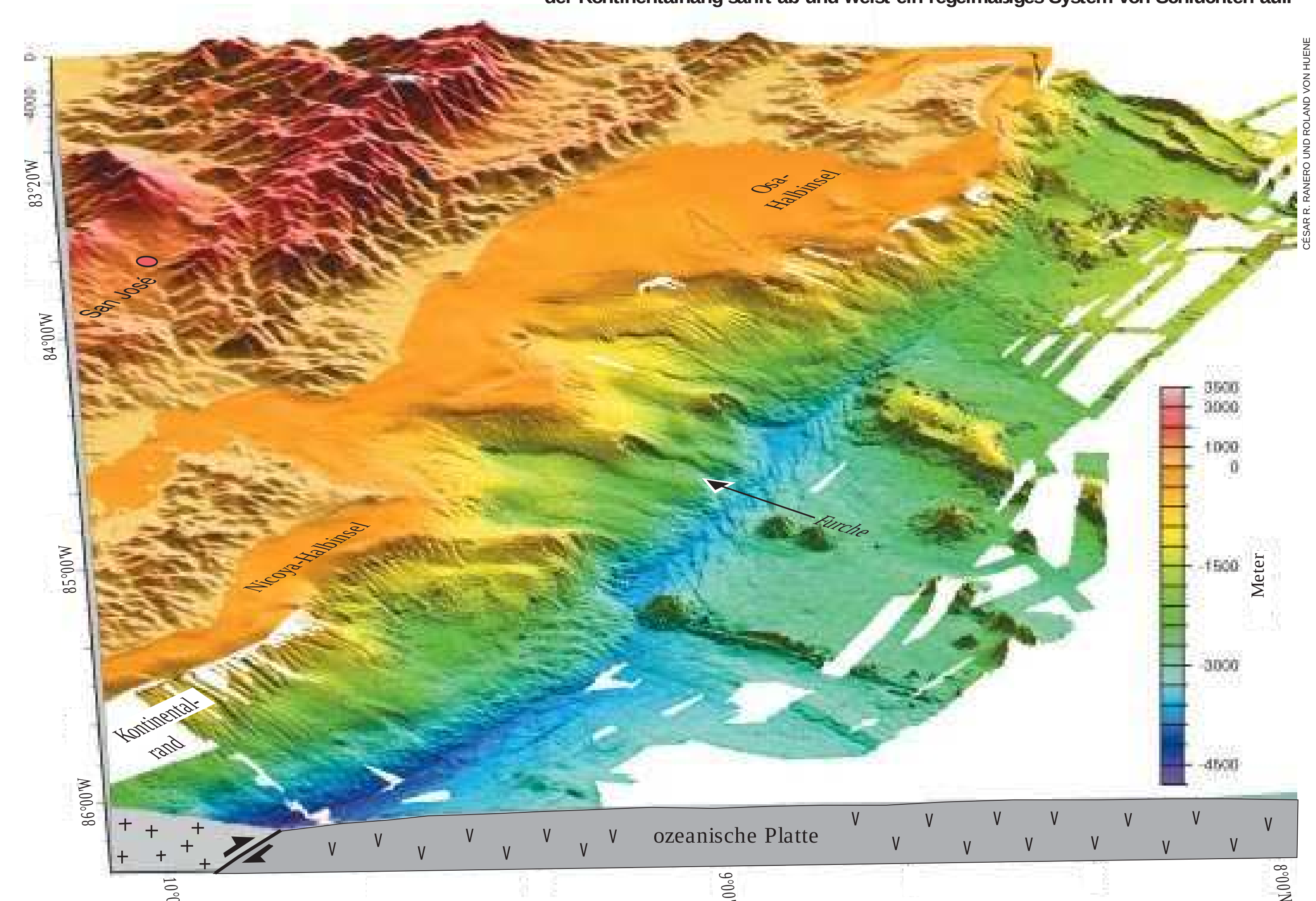
Von César R. Ranero und Roland von Huene

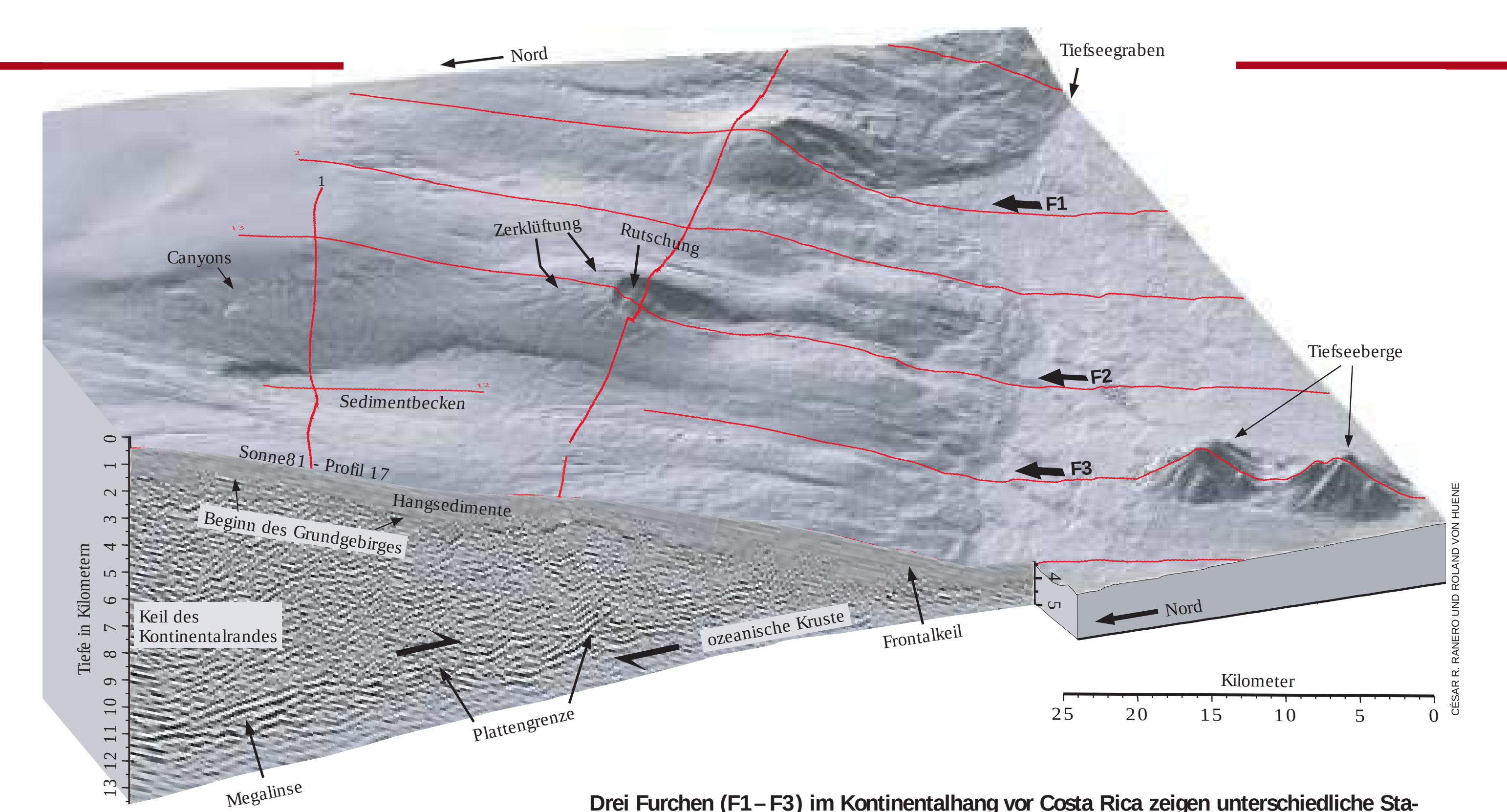
Die etwa hundert Kilometer dicke, feste Schale des Erdballs – die so genannte Lithosphäre – gliedert sich in eine Anzahl von Platten, die auf dem zähplastischen Erdmantel „schwimmen" und sich relativ zueinander bewegen. Dabei kollidieren sie an mehreren Stellen auch miteinander. Ist ein Kollisionspartner eine kontinentale und der andere eine ozeanische Platte, reicht die höhere Dichte der letzteren im Allgemeinen aus, dass sie sich unter die spezifisch leichtere kontinentale Platte schiebt und schräg zurück in den Erdmantel sinkt. Diese so genannte Subduktion findet zum Beispiel an der Westküste Süd- und Mittelamerikas statt.

Die Wechselwirkung zwischen der abtauchenden und der darüber fahrenden Platte setzt sich entlang der Kontaktfläche zwischen beiden über mehrere Dutzend Kilometer bis in Tiefen von über hundert Kilometern fort. Dabei kommt es zu einem bedeutenden Austausch von Gesteinsmassen und Fluiden (Flüssigkeiten oder Gasen), der einen intensiven Vulkanismus hervorruft. An den Rändern kollidierender Platten treten daher weltweit die meisten Vulkaneruptionen auf. Hier entladen sich zudem neunzig Prozent der seismischen Energie auf der Erde.

Manchmal schabt die obere Platte von der abtauchenden Lithosphäre Sedimente ab, die dann an ihrem Rand zu einem so genannten Akkretionskeil aufgeschoben werden. Dies ist jedoch kein effizienter Prozess; daher verbleibt viel Sediment auf der absinkenden ozeanischen Platte und wird zusammen mit ihr in die Tiefe verfrachtet.

Das perspektivische Relief des Kontinentalrandes vor der Pazifikküste Costa Ricas beruht auf Fächerecholot-Daten, die das deutsche Forschungsschiff „Sonne" auf mehreren Fahrten gesammelt hat. Die Höhen sind farbcodiert und Festlandbereiche nach älteren Karten mit geringerer Auflösung wiedergegeben. Die abtauchende ozeanische Platte besteht aus drei morphologisch unterschiedlichen Regionen: dem Cocos-Rücken (oben rechts), einem Gebiet mit großen Tiefseebergen (Mitte) und einem glattem Segment (unten links). Diese Dreiteilung spiegelt sich auch in der Topographie des Kontinentalrandes wider. Gegenüber dem Cocos-Rücken hat er sich gehoben; hier finden sich ein schmaler Schelfabhang und eine Halbinsel. Wo die Tiefseeberge subduziert werden, ist die Hangbasis von Furchen durchsetzt. Vor dem flachen Ozeanboden fällt der Kontinentalhang sanft ab und weist ein regelmäßiges System von Schluchten auf.





Drei Furchen (F1–F3) im Kontinentalhang vor Costa Rica zeigen unterschiedliche Stadien der Subduktion von Tiefseebergen. Eine Aufwölbung am Ende der Furchen F1 und F2 verrät die momentane Position von zweien dieser bereits „abgetauchten" Berge. Im reflexionsseismischen Profil ist die Obergrenze der absinkenden Platte bis in etwa elf Kilometer Tiefe deutlich zu erkennen. Unmittelbar darüber befinden sich an einigen Stellen riesige Gesteinslinsen. Sie bestehen vermutlich aus Material, das von der kontinentalen Platte abgeschabt wurde und nun mit subduziert wird. In dem kleinen Frontalkeil haben sich dagegen vermutlich Sedimente angelagert, welche die kontinentale von der ozeanischen Platte abgekratzt hat. Rote Linien markieren den Verlauf seismischer Profile.

Umgekehrt passiert es aber auch, dass die untere Platte Material von der oberen abhobelt. Eine solche Subduktionserosion kann an zwei Stellen stattfinden: am Fuß des Kontinentalhanges am vorderen Plattenrand und an der Unterseite der kontinentalen Platte. Ersteres zeigt sich daran, dass der Kontinentalhang an dieser Stelle zerklüftet und eingebuchtet ist; Letzteres erkennt man an einer Absenkung des Plattenrandes um mehrere Kilometer – von fast Meeresspiegel-Niveau auf die Meerestiefe unterhalb des Kontinentalhanges. Wenn die obere Platte so weit absackt, muss sie von unten stark verdünnt worden sein.

Schnappschüsse eines Dramas unter der Kruste

Besonders dramatische Beispiele für Subduktionserosion bieten Tiefseeberge, die sich mit der abtauchenden ozeanischen Platte unter den Kontinentalrand schieben. Faszinierende Schnappschüsse dieses Vorgangs lieferte nun erstmals die großflächige Vermessung des Pazifikbodens vor Costa Rica (Bild links). Die ozeanische Platte bewegt sich hier mit etwa neun Zentimetern pro Jahr frontal auf den Kontinent zu.

Detaillierte Reliefkarten des Meeresgrundes, die das deutsche Forschungsschiff „Sonne" mit Fächerecholoten aufgenommen hat, zeigen charakteristische Strukturen, die zehn bis zwanzig Kilometer breite und 1000 bis 2500 Meter hohe Tiefseeberge in verschiedenen Stadien ihres Vordringens unter die kontinentale Kruste geschaffen haben. So verlaufen im Kontinentalhang mehrere Furchen senkrecht zur Plattengrenze (Bild oben). Teils zeigen lokale Hebungen am Ende der Furche noch an, wo sich der jeweilige Tiefseeberg auf seinem Weg hinab in den Erdmantel gerade befindet.

Wenn ein Tiefseeberg sich in die Basis der kontinentalen Platte pflügt, schiebt er zunächst deren dünne Randzone beiseite, die aus angelagerten weicheren Sedimenten besteht. Dabei zerstört er die Hangbasis und ritzt eine etwa zehn Kilometer lange Kerbe in den Plattenrand (F1 im Bild oben).

Danach endet die Zone weicher Sedimente, und der Tiefseeberg trifft auf den harten Kern der kontinentalen Platte, der aus Gestein des Grundgebirges besteht. Die Folgen sind nicht ganz so dramatisch, wie man vermuten könnte. Entlang der Grenzfläche zwischen den Platten sammeln sich nämlich Fluide, die unter hohem Druck stehen und die Scherfläche schmieren. Dadurch verringern sie die Deformation und Erosion. Allerdings werden die Sedimente am Meeresboden über dem Gipfel des Tiefseeberges zunächst stark gedehnt und auseinandergebrochen. Dann kippt der Meeresboden seewärts, sodass die Sedimentdecke schließlich den Hang hinunterrutscht. Dadurch entsteht eine Furche, die so breit ist wie die Spitze des Tiefseeberges (F2 im Bild oben).

Bei der weiteren Subduktion schabt der Tiefseeberg schließlich auch Material von der Unterseite der oberen Platte ab. Dies lässt sich auf der neuen, detaillierten Karte des Meeresbodens vor Costa Rica erstmals direkt erkennen. Dort erscheint eine breite Furche, die mehr als 50 Kilometer den Kontinentalhang hinaufläuft (F3 im Bild oben). Obwohl sie teilweise mit jüngeren Sedimenten angefüllt ist, zeigt ihre Tiefe an, dass die obere Platte durch tektonische Erosion an ihrer Basis Material verloren hat, während der abtauchende Tiefseeberg unter ihr entlang geschrammt ist.

Zusätzlich zur oberflächlichen Kartierung des Kontinentalrands bei Costa Rica per Fächerecholot wurde mit seismischen Methoden auch der Untergrund „durchleuchtet". Dabei machten die Geophysiker eine weitere interessante Entdeckung: Dicht oberhalb der abtauchenden ozeanischen Platte sind riesige Gesteins- ▶

linsen von 10 bis 15 Kilometern Länge und 1 bis 1,5 Kilometer Höhe zu erkennen. Woher stammen diese Megalinsen? Sind es subduzierte Sedimente, die sich von der abtauchenden ozeanischen Platte gelöst und von unten an die kontinentale Platte angelagert haben? Oder bestehen die Megalinsen umgekehrt aus erodiertem Material der oberen Platte, das sich die untere Platte einverleibt hat?

Eine Anlagerung von Material an die obere Platte oder eine Verdickung durch Kompression erscheint wenig wahrscheinlich; denn dann müsste die kontinentale Platte oberhalb der Megalinsen deutlich angehoben worden sein. Dafür finden sich aber keine Anzeichen; stattdessen erscheint die obere Platte durch normale Abschiebungen gedehnt. Das spricht für die zweite Vermutung, wonach die Linsen große Gesteinskörper sind, die sich von der oberen Platte abgelöst haben und nun zusammen mit der unteren die Subduktionszone hinabwandern.

Nach dem Ablösen könnten die Linsen mit der Zeit zerbrechen und schließlich völlig zerrieben werden; sie würden dann in Form von Schlamm entlang der Subduktionszone weiter transportiert. Nie zuvor war es gelungen, eine solche Form der Erosion mit geophysikalischen Methoden abzubilden. Die neuen Beobachtungen ermöglichen damit ein besseres Verständnis, wie die basale Erosion kontinentaler Platten an Subduktionszonen abläuft und welche Art von Material jene Vulkane bildet, die den Pazifischen Ozean wie ein Feuergürtel umgeben.

Insgesamt liefern die Ergebnisse von Costa Rica Einblicke in den subduktionsbedingten Material- und Fluidtransport in das Erdinnere, wie es sie so detailliert nie zuvor gegeben hat. Das ist umso wichtiger, als die Materialien, die an Subduktionszonen in die Tiefe wandern, den Entstehungsort und die Eigenschaften schwerer Erdbeben beeinflussen. Seit langem fragen sich die Geophysiker, welche Prozesse es sind, die immer wieder schlagartig gewaltige Mengen seismischer Energie tief unter den Küstenregionen des Pazifik und des Mittelmeeres freisetzen. Eine weitere offene Frage ist, warum einige Erdbeben verheerende Flutwellen (Tsunamis) hervorrufen, andere aber nicht.

Je höher die Auflösung seismischer Reflexionsdaten ist und je leistungsfähiger die Computerprogramme zu ihrer Auswertung sind, desto mehr Einzelheiten kommen ans Licht, die das Verständnis – und damit möglicherweise auch die Vorhersage – von Naturkatastrophen erleichtern. Leider ist die Wissenschaft aus Kostengründen nicht in der Lage, die derzeit fortschrittlichsten Techniken einzusetzen. Sie muss immer noch mit geophysikalischen Methoden auskommen, die der Standardausstattung bei der geophysikalischen Exploration der Ölindustrie um 10 bis 15 Jahre hinterherhinken. ■

Dr. César R. Ranero *hat Geologie an der Universität des Baskenlandes studiert und 1993 an der Universität Barcelona (Spanien) promoviert. Er arbeitet seitdem am Geomar Forschungszentrum für Marine Geowissenschaften der Universität Kiel.*
Prof. Roland von Huene *hat an der Universität von Kalifornien in Los Angeles Geologie studiert und 1960 promoviert. Er arbeitete für die US-Marine und für das Geologische Bundesamt der USA, ehe er 1989 die Abteilung „Marine Geodynamik“ am Geomar gründete. Seit der Emeritierung im Jahre 1996 lebt er abwechselnd in Kalifornien und Kiel.*

POPULATIONSGENETIK

Gesegnet mit ererbtem Reichtum

Die Abgeschiedenheit einer Insel fördert Inzucht – sollte man meinen. Doch die Bewohner Islands erfreuen sich offenbar der größten genetischen Vielfalt unter allen Europäern.

Von Axel Brennicke

Vor zwei Jahren machte die Regierung Islands ein spektakuläres Geschäft. Sie verkaufte die Rechte an den medizinischen und genetischen Daten der 275000 Inselbewohner exklusiv an die Firma deCODE Genetics. Für einige Millionen Dollar darf das amerikanische Unternehmen vorerst zwölf Jahre lang genetische Profile in isländischen Familien auf ihre Verknüpfung mit Erbkrankheiten untersuchen. Die Firma hofft, dadurch Gene zu finden, die Veranlagungen für die verschiedensten Krankheiten beinhalten – von der Schuppenflechte über den Brustkrebs bis zum Schlaganfall.

Warum waren die Spezialisten von deCODE Genetics gerade auf die Gendaten der Isländer erpicht? Einer der Gründe ist die Annahme, dass die ferne Lage der Insel und die jahrhundertelange Isolation ihrer Bewohner Inzucht begünstigt und so einen hochgradig homogenen Genpool geschaffen habe. Dergleichen ist für die Suche nach statistischen Zusammenhängen zwischen Erkrankungen und Erbgut besonders günstig.

Doch möglicherweise stimmt die Annahme nicht. Jetzt haben Einar Arnason und seine Kollegen von der Universität Island in Reykjavik die Probe aufs Exempel gemacht. Sie untersuchten einen repräsentativen Querschnitt von 73 Isländern auf ihre genetische Variabilität und verglichen die Ergebnisse mit dem Genpool in anderen europäischen Ländern (*„Nature Genetics“, Bd. 25, S. 373*). Das überraschende Ergebnis: Auf Island ist die genetische Vielfalt keineswegs geringer, sondern sogar größer als auf dem Festland.

Über die Ursachen dieser Merkwürdigkeit lässt sich im Moment nur spekulieren. Möglicherweise nahm an der Besiedlung Islands vor etwa 1100 Jahren ein guter Querschnitt der europäischen Bevölkerung teil, zumindest was die Gene betrifft. Vielleicht sorgten am Anfang durchziehende Wikinger für frisches Blut; später gingen viele Isländer auf Arbeitssuche ins Ausland, von wo sie ihre Partner und Nachkommen mit zurück auf die Insel brachten. So könnte die Paradoxie zu erklären sein, dass sich ausgerechnet auf diesem abgelegenen Eiland das differenzierteste Erbgut in ganz Europa findet.

Der Firma bleibt ein Trost: Sie hatte einen zweiten Grund, die isländische Bevölkerung als Genreservoir zu wählen, in dem sich gut nach erblichen Krankheitsdispositionen fahnden lässt. Die Bewohner der unwirtlichen Insel sind nämlich begeisterte Genealogen, die ihre Abstammung und Verwandtschaftsverhältnisse vielfach über Jahrhunderte zurückverfol-


HARPA SVEINSDOTTIR, AKUREYRI

Nicht nur äußerlich, sondern auch genetisch sehr verschieden: Schüler einer Abiturklasse in Island

gen können. Mit diesem Pfund zumindest kann deCODE Genetics weiterhin wuchern.

Aber auch andere Firmen folgen auf ihre Weise der vermuteten Goldader. So sucht das kalifornische Unternehmen DNA Sciences im Internet Freiwillige, die Krankheiten in ihrer Familiengeschichte angeben sowie Informationen zu ihrer Lebensweise und eine Blutprobe zur Verfügung stellen. Unter www.DNA.com kann man einen Fragebogen über die medizinische Geschichte der Familie ausfüllen, woraufhin die Firma jemanden zum Blutabnehmen vorbeischickt – bisher allerdings nur in den USA. Das Ziel, mindestens 100 000 Personen in die Datenbank aufzunehmen, wird sicherlich bald erreicht sein. In der ersten Woche haben schon tausend Freiwillige den Fragebogen ausgefüllt.

Für das nächste Jahr planen das Medical Research Council und der Wellcome Trust in England ein ähnliches Projekt. Sie wollen Daten von etwa 500 000 Personen im „besten Alter“ erheben, um auch weitläufige Verbindungen zwischen Genen, Lebensstil und Krankheiten statistisch absichern zu können. Und so wird es vielleicht nicht mehr lange dauern, bis wir uns alle mit unserem genetischen Profil und unseren kleinen Lastern oder Schwächen in solchen Datenbanken wiederfinden. Ob sich die medizinische Verheißung erfüllt, bleibt abzuwarten; die Gefahr für den Datenschutz ist dagegen real. ■

Prof. Dr. Axel Brennicke *lehrt Botanik an der Universität Ulm.*

BSE und kein Ende

Nun hat der Rinderwahn auch die deutschen Viehställe erfasst. Prof. Dr. Detlev Riesner, Leiter des Instituts für Physikalische Biologie und Mitglied des Biologisch-Medizinischen Forschungszentrums an der Universität Düsseldorf, äußert sich zum Stand der BSE-Krise.

Spektrum der Wissenschaft: *Ist die Aufregung um die ersten BSE-Fälle in Deutschland gerechtfertigt?*

Professor Detlev Riesner: Ich kann sie nur teilweise nachvollziehen. Beunruhigend ist, dass BSE nicht hätte auftreten dürfen, weil seit sechs Jahren die Verfütterung von Tiermehl an Wiederkäuer verboten ist. Es gibt natürlich die marginale Möglichkeit, dass die Rinder spontan, also ohne äußeren Anlass krank geworden sind; aber das wäre eine unglaubliche Koinzidenz. Davon können wir nicht ausgehen.

Spektrum: *Demnach hat das EU-Gesetz von 1994 offenbar nicht gegriffen. Ist das generelle Verbot von Tiermehl eine angemessene Reaktion?*

Riesner: Ich würde nicht sagen, das Gesetz hätte nicht gegriffen. Aber es gab offenbar Löcher bei der Kontrolle. Für das nun beschlossene generelle Tiermehlverbot sehe ich keinen wissenschaftlichen Grund, nur einen ordnungspolitischen Anlass, nämlich durch dieses Gesetz die Verfütterung an Rinder effektiv zu verhindern.

Spektrum: *Sinn würde das generelle Verbot für Tiermehl dann machen, wenn die Artenschranke leichter zu überwinden wäre als bisher bekannt, wenn also Prionen – jene Proteine, die Scrapie bei Schafen, BSE bei Rindern und die neue Variante der Creutzfeld-Jakob-Krankheit beim Menschen hervorrufen – auch Schweine, Geflügel oder Fische befallen könnten. Gibt es dazu neuere Erkenntnisse?*

Riesner: Die Artenschranke ist prinzipiell nicht leicht zu überwinden. Sie ist zwischen Wiederkäuern wie Schaf und Rind geringer – und leider auch zwischen Rind und Mensch. Die Artenschranke etwa von Rind auf Schwein hat man bisher nur im Experiment überwinden können. Dabei erhielt jedoch das Schwein eine Injektion von infiziertem Material direkt ins Gehirn – auf eine solche Idee würde kein Bauer kommen. Selbst wenn ein Schwein mit infektiösem Tiermehl gefüttert wird, erkrankt es sehr wahrscheinlich nicht – zumal seine Lebenszeit für eine massive Ausbreitung des Erregers zu kurz ist.

Spektrum: *Das Prion-Protein existiert in zwei Formen: einer natürlichen, die harmlos ist, und einer mit veränderter Struktur oder Konformation, die krank macht. Die veränderten Partikel infizieren die natürlichen, indem sie diese zum Umklappen in die falsche Konformation veranlassen. Weiß man inzwischen, wie dieser Vorgang genau abläuft?*

Riesner: Der prinzipielle molekulare Mechanismus ist leider immer noch unbekannt. Viele Labors der Welt arbeiten daran, den Umklapp-Effekt *in vitro*, also im „Reagenzglas“, nachzuvollziehen und damit die Prion-Hypothese wirklich molekular zu beweisen. Dann müsste man aber künstlich infektiöse Partikel erzeugen können, und das war bisher nicht möglich.

Spektrum: *Können Prionen außer durch die Nahrung auch anders übertragen werden – etwa über Ausscheidungen, die als Naturdünger auf die Weide kommen?*

Riesner: Bei Rindern ist ein Infektionsweg über die Weide unwahrscheinlich. Selbst wenn Weiderinder durch verunreinigtes Tierfutter infiziert wären, betrüge die Erregermenge in den Ausscheidungen nur einen sehr geringen Bruchteil derjenigen im Futter. Man hat in Großbritannien keinen epidemiologischen Zusammenhang mit einer Verseuchung von Weidevieh erkennen können. Beim Schaf ist das Risiko einer Infektion über die Weide dagegen hoch. Schafwiesen können verseucht werden. Anders als heute gab es dadurch früher auch in Deutschland Scrapie-Epidemien. Doch die Schafhalter befolgten damals einfach von sich aus empirische veterinärhygienische Regeln und brannten die Wiese ab. Und so haben sie wohl die Epidemie in den Griff bekommen. Eine Übertragung über die Weide ist auch dadurch möglich, dass ein ablammendes Mutterschaf die hochinfektiöse Nachgeburt dort zurücklässt und die anderen Tiere sie fressen. Zudem sind die Innereien des Schafes viel ansteckender als die der Kuh. Bei Rindern hat man Prionen nur in bestimmten Lymphknoten und im Enddarm gefunden, bei Schafen dagegen auch in der Milz und in anderen Organen. Schafe kratzen sich auch sehr stark an Zäunen und Pfählen; dadurch ist gleichfalls eine Übertragung möglich.

Spektrum: *Kennt man noch andere Übertragungswege?*

Riesner: Einigermaßen gesichert ist der vom Muttertier auf das Kalb. Die Wahrscheinlichkeit einer Übertragung sechs Monate vor Krankheitsausbruch bei der Mutter liegt aber nur bei zehn Prozent, ist also sehr gering.

Spektrum: *Wie groß ist das Risiko einer Verbreitung durch Insekten?*

Riesner: Wir haben bei uns im Labor Maden von Fleisch fressenden Fliegen auf infiziertes Rinderhirn gesetzt. Nach dem Verpuppen der Maden konnten wir in ihren Innereien – mit der Zeit abnehmend – Infektiosität nachweisen. Wenn also die Puppen auf der Wiese gefressen werden, haben wir ein Problem. Jetzt wollen wir experimentell herausfinden, ob auch Fliegen Prionen übertragen können. Dazu müsste eine mögliche Infektiosität in der Puppe bis ins Fliegenstadium erhalten bleiben. In diesem Falle würde es gefährlich.

Spektrum: *Könnte die neue Variante der Creutzfeld-Jakob-Krankheit durch Bluttransfusionen in Krankenhäusern übertragen werden?*

Riesner: Bei der klassischen Variante ist dieser Übertragungsweg nie nachgewiesen worden. So haben Blutspender, die später krank geworden sind, epidemiolo-



ERIC LICHTENSCHEIDT

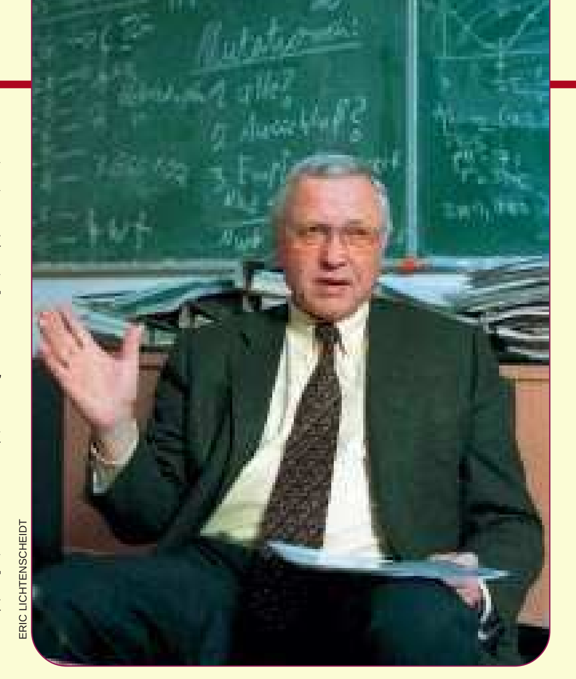
gischen Untersuchungen zufolge keinen der Empfänger angesteckt. Bei der neuen Variante ist das nicht sicher. Diese Erreger-Stämme finden sich wohl vermehrt auch im peripheren Kreislauf, etwa in den Mandeln, und so besteht wohl eine Gefahr bei Bluttransfusionen.

Spektrum: *Was weiß man über das Erkrankungsrisiko, über Dispositionen? In einer Herde erkrankt ja auch nicht jede Kuh ...*

Riesner: Nur ein bis zwei Prozent der mit Prionen-verseuchtem Tiermehl gefütterten Rinder infizieren sich. Man kennt eine genetische Disposition: eine bestimmte veränderte Aminosäure im natürlichen Prion-Protein. Betrachten wir – nach der bisherigen empirischen Erfahrung mit vCJK-Patienten – die Disposition des Menschen, so sind 35 Prozent anfällig, 50 Prozent dagegen nicht, und bei den restlichen 15 Prozent weiß man es nicht. Das betrifft die Anfälligkeit, die direkt im Prion-Gen angesiedelt ist. Es gibt wohl auch eine gewisse Anfälligkeit, die von benachbarten Bereichen herrührt, aber sie ließ sich natürlich nur im Tiermodell feststellen, nicht beim Menschen.

Spektrum: *Anbieter von BSE-Tests haben derzeit Hochkonjunktur. Sind diese Tests zuverlässig?*

Riesner: Ja. Die Tests, die unter anderen die Schweizer Firma Prionics zur Zeit kommerziell anbietet, beruhen auf einer zehn Jahre alten, ausgereiften Technologie. Dabei werden Proteine aus Gewebeproben des Gehirns durch ein Enzym namens Protease abgebaut; nur das infektiöse Prion-Protein bleibt wegen seiner Stabilität intakt, und Antikörpertests weisen es dann nach. Allerdings können die Tests die krankmachenden Prionen erst anzeigen, wenn diese sich bereits stark ausgebreitet haben. Deshalb werden neue Verfahren für empfindlichere Tests entwickelt. Das Labor von Stanley Prusiner, dem Pionier der Prionenforschung, arbeitet an einem Test, der nicht das Endprodukt, sondern schon das Intermediär-Produkt, das viel früher erscheint, nachweisen soll. Dabei handelt es sich um eine bereits umgewandelte Form, die aber noch durch das Enzym Protease abgebaut wird. So ließe sich die Infektion nicht erst einen oder zwei Monate, sondern vielleicht schon ein Jahr vor Ausbruch der Krankheit feststellen. Auch wir arbeiten zusammen mit der Firma Evotec an einem neuen Test. Er arbeitet mit der so genannten Fluoreszenz-Korrelations-Spektroskopie und nutzt nicht die Protease-Beständigkeit der infektiösen Prionen aus, sondern ihre Fähigkeit, sich zu Aggregaten zu vereinigen, also praktisch zu verklumpen.


ERIC LICHTENSCHEIDT

„Vielleicht müssen wir mehr mit anderen Übertragungswegen rechnen."

Spektrum: *Die Firma Vetmedica, eine Tochter des Pharmakonzerns Boehringer-Ingelheim, hat angeblich einen Bluttest entwickelt, mit dem sich die Infektion schon am lebenden Tier nachweisen lässt. Wie funktioniert er? Und bringt er den Durchbruch für eine optimale Kontrolle?*

Riesner: Bisher konnten im Blut erkrankter Tiere keine Prionen nachgewiesen werden. Vielleicht stützt sich der erwähnte Test auf einen Faktor im Blut, der die Infektion indirekt anzeigt. Die äußerst spärlichen Informationen von Boehringer-Ingelheim reichen für eine Bewertung derzeit nicht aus. Ein zuverlässiger Test am lebenden Tier wäre natürlich ein gewaltiger Fortschritt. Mit allzu optimistischen Erwartungen sollte man aber im Moment noch vorsichtig sein.

Spektrum: *Bisher war die Creutzfeld-Jakob-Krankheit unheilbar. Wie beurteilen Sie die Aussichten auf eine Therapie?*

Riesner: Es gibt bisher nur einige Ansätze dazu. Sie laufen darauf hinaus, die Umfaltung und das anschließende Aggregieren – also Verklumpen – der Proteine mit der falschen Struktur zu verhindern. So kennt man Peptide, die sich spezifisch an das natürliche Prion-Protein anlagern und sein Umklappen in die falsche Konformation hemmen können. Bis zum praktischen Einsatz ist es aber noch ein weiter Weg.

Spektrum: *In Großbritannien haben sich Forscher laut über die Ignoranz der Politiker beschwert. Haben die offiziellen Gesundheitshüter auf schon skandalöse Weise versagt, oder waren die Wissenschaftler zu leise?*

Riesner: Was die britischen Wissenschaftler schon früh an Erkenntnissen gewonnen hatten, hätte die britische Regierung allemal wissen können. Sie hat aus politischer Opportunität aber nicht auf die aktuellsten Berichte und Gutachten zurückgegriffen, sondern sich viel zu lange auf den Southwood-Report gestützt, der das Risiko für den Menschen als verschwindend gering einschätzte. Auf einer Konferenz in England 1991 antwortete Prusiner auf die Frage, ob BSE auf den Menschen übertragbar sei, wir Wissenschaftler müssten ehrlicherweise zugeben, dass wir es nicht wüssten. Darauf bemerkte der Chief Medical Officer, Keith Meldrum, BSE könne ganz sicher nicht übertragen werden. Wer definiert wissenschaftliche Erkenntnis: ein Politiker oder eine anerkannte wissenschaftliche Größe? Eine solche Anmaßung der Politik ist schlimm.

Spektrum: *Haben Sie in den letzten Jahren Ihre Risiko-Einschätzung revidieren müssen, oder entspricht die momentane Entwicklung Ihren Erwartungen?*

Riesner: Ich habe immer vorausgesagt, dass wir in Deutschland auch ein paar Fälle der neuen Creutzfeld-Jakob-Variante bekommen würden – allein schon durch die Reisen Deutscher nach England. Ich bin von ein paar Prozent der britischen Fälle ausgegangen; glücklicherweise sind es bisher sehr viel weniger, aber die Statistik schützt uns noch nicht. Was die BSE-Fälle bei Rindern in Deutschland betrifft, war ich schon vor den Routine-Tests davon überzeugt, dass bei entsprechend rigorosen Überprüfungen einige infizierte Kühe gefunden würden. Derzeit rechne ich mit maximal so vielen wie in Frankreich, wahrscheinlich weniger, und bestimmt werden wir keine britischen Verhältnisse bekommen. Aber es gibt auch eine negative Erfahrung: Die britische Epidemie geht nicht so schnell zurück wie vorausgesagt. Vielleicht müssen wir in der Tat mehr mit anderen Übertragungswegen rechnen.

Spektrum: *Essen Sie noch alles?*

Riesner: Ich würde Hirn heute auch in Deutschland nicht essen. Was Fleischprodukte wie Wurst angeht, hat die heimische Fleischindustrie leider versäumt, klar zu sagen, dass sie dafür kein Hirn mehr verwendet – und natürlich müsste das auch wirklich stimmen. Bei einem Steak habe ich sicher keine Bedenken. ■

Das Interview führten Marion Kälke und Dieter Beste.

(Seiten 18, 19 und 20: Anzeige und Beihefter)

MEDIZIN

Schluss mit dem Versteckspiel des Tuberkulose-Erregers

Der Auslöser der Tuberkulose ist deshalb so tückisch, weil er, vom Immunsystem unbemerkt, in bestimmten Abwehrzellen überdauern kann. Doch auch in seinem Versteck braucht er Energie, die er auf einem speziellen Syntheseweg gewinnt. Dies nutzt ein neuartiger Therapieansatz.

Von Dagmar Knopf

Mehr als ein Jahrhundert liegt die Entdeckung des Tuberkulose-Erregers durch Robert Koch nun zurück. Doch die Seuche ist bis heute nicht besiegt. Noch immer infiziert sich jedes Jahr ein Prozent der Weltbevölkerung, und bei zwei Millionen Menschen endet die Infektion tödlich.

Besonders hoch ist die Zahl der Tuberkulose-Fälle in Südostasien. Seit den frühen neunziger Jahren steigt die Infektionsrate aber auch in seit langem ungefährdeten Erdteilen wie den USA oder Europa wieder an. In Großbritannien etwa hat sie in den letzten zehn Jahren um achtzig Prozent zugenommen.

Auslöser der Krankheit ist das *Mycobacterium tuberculosis*, das durch Tröpfcheninfektion verbreitet wird. Schon wenige Exemplare im Speichel eines Patienten mit offener Tuberkulose reichen für die Übertragung aus. Die Inkubationszeit beträgt vier bis sechs Wochen; dabei treten unspezifische Symptome wie Appetitlosigkeit, Müdigkeit und Gewichtsverlust auf. Obwohl hauptsächlich die Atemwege von der Erkrankung betroffen sind, können grundsätzlich alle Organe befallen werden.

Wegen der hohen Ansteckungsgefahr ist eine sofortige Diagnose und Behandlung äußerst wichtig. Bisher müssen die Kranken über einen Zeitraum von mindestens sechs Monaten Antibiotika einnehmen, um der Infektion dauerhaft Herr zu werden.

Dies ist nicht nur teuer – die lange Dauer der Therapie birgt auch ein hohes Risiko, dass sie nicht korrekt bis zum Ende durchgeführt wird und daher erfolglos bleibt. Manchmal hören die Patienten vorzeitig auf, ihre Medikamente einzunehmen, weil sie sich besser fühlen. Vor allem in Entwicklungsländern ist zudem die Lieferung der Antibiotika teilweise unzuverlässig.

Doch diese Probleme könnten schon bald der Vergangenheit angehören; denn nun verspricht ein neuer Therapieansatz, die Behandlungsdauer auf wenige Wochen zu verkürzen. Er richtet sich gezielt gegen eine Achillesferse des Bakteriums, die erst kürzlich entdeckt wurde. ▶



WÜNSCH / IFA

Ausgestrichenes Blutserum eines Tuberkulosepatienten mit *Mycobacterium tuberculosis* (rot angefärbt)

Auch wenn das Immunsystem mit den Krankheitserregern allein gelassen wird, bekämpft es sie während der ersten infektiösen Phase meist noch recht erfolgreich und kann ihre Anzahl auf einige wenige reduzieren. Doch das Bakterium verschwindet nicht ganz. Es entkommt der völligen Vernichtung, indem es in bestimmten Abwehrzellen – so genannten Makrophagen oder Fresszellen – Unterschlupf sucht und sich dort vor weiteren Angriffen des Immunsystems versteckt. Erst wenn die Körperabwehr des Wirtes geschwächt ist – etwa durch eine HIV-Infektion –, schlägt der Erreger wieder zu, und die Krankheit bricht erneut aus – meist mit tödlichem Ende.

Doch auch nachdem das Bakterium in den Makrophagen untergetaucht ist, erhält es gewisse Lebensfunktionen aufrecht. So gewinnt es auf einem besonderen Stoffwechselweg, der als Glyoxylatzyklus bekannt ist und nur in Bakterien, Pilzen und Pflanzen vorkommt, aus Fettsäuren Energie.

John McKinney und seine Kollegen vom Laboratory of Infection Biology der Rockefeller-Universität in New York haben nun geprüft, ob ein Eingriff in diesen Stoffwechselweg dem Bakterium vielleicht den Todesstoß versetzen könnte. Dabei konzentrierten sie sich auf ein Enzym, das im Glyoxylatzyklus benötigt und vom Tuberkulose-Erreger selbst hergestellt wird: die Isocitrat-Lyase. Um festzustellen, wie wichtig dieses Enzym für das Überleben der Bakterien ist, erzeugten die Forscher einen Stamm, der keine Isocitrat-Lyase produzieren konnte. Zwar gedieh er in der Anfangsphase der Infektion genauso gut wie die normalen Erreger, aber in der späteren stillen Phase erwies er sich als nicht überlebensfähig.

Eine Erfolg versprechende Therapie könnte also darin bestehen, die Isocitrat-Lyase auszuschalten. Das kann mit einer Substanz geschehen, die sich an das aktive Zentrum des Enzyms anlagert und es blockiert.

Bei der Entwicklung eines solchen Hemmstoffs ist es hilfreich, die Struktur des Zielmoleküls zu kennen. Entsprechende Untersuchungen durch James Sacchettini von der Texas-A&M-Universität in College Park ergaben, dass das Enzym bei der Arbeit seine Form ändert. Nachdem es das umzuwandelnde Partnermolekül gebunden hat, schließt es das aktive Zentrum und nimmt eine kompaktere räumliche Gestalt an. Erst nach dem Ende der Umwandlung öffnet es sich wieder und entlässt die Reaktionsprodukte.

Ein künftiges Medikament könnte genau an diesem Punkt ansetzen. Man bräuchte einen synthetischen Hemm-

stoff, der sich an das aktive Zentrum bindet, aber nicht umgesetzt werden kann. Dann würde das Enzym dauerhaft in seiner geschlossenen Form gehalten und wäre nicht mehr funktionsfähig. Von seiner Energiequelle abgeschnitten, müsste der Erreger buchstäblich verhungern. Da die Isocitrat-Lyase in Wirbeltieren – und somit auch im Menschen – nicht vorkommt, sollte ihre Blockade keine gefährlichen Nebenwirkungen hervorrufen.

Und weil der Wirkstoff das Bakterium gezielt in seinem Versteck bekämpft, würde sich auch die Dauer der Behandlung deutlich verkürzen – von bisher mindestens sechs Monaten auf nur noch einige Wochen. Dies sollte die Akzeptanz und exakte Befolgung der Therapie durch die Patienten und damit die Heilungsrate verbessern – ein großer Fortschritt, wenn man bedenkt, dass ein Drittel der Weltbevölkerung mit den Bakterien infiziert ist. ■

Dagmar Knopf ist promovierte Biologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Düsseldorf.

Serie: Die Botschaft des Genoms (Teil V)



Anlässlich der Entschlüsselung des menschlichen Erbguts stellen wir zwölf darin codierte Proteine in einer Serie beispielhaft vor.

Rhodopsin

Purpur im Auge



GRAFIK: JEFF JOHNSON

Michael Groß ist Biochemiker in Oxford (England)

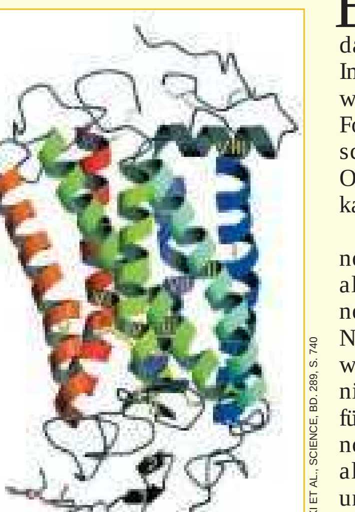
Wenn Licht auf die Netzhaut des Auges fällt, löst es ein chemisches Signal aus, das über mehrere Zwischenschritte wiederum einen Nervenimpuls erzeugt; dieser wird ins Gehirn weitergeleitet, wo die Verarbeitung der visuellen Information und damit das eigentliche Sehen stattfindet. Die erste Station auf diesem komplizierten Signalweg befindet sich in der Außenmembran der Netzhautzellen (Stäbchen und Zapfen). Als Signalwandler in den lichtempfindlicheren (aber farbenblinden) Stäbchen dient das Rhodopsin, wegen seiner Farbe auch Sehpurpur genannt. Es besteht aus dem Protein Opsin und einem kleinen, aber wichtigen Anhängsel: dem von Vitamin A abgeleiteten Molekül Retinal.

Aus der charakteristischen Abfolge von wasserliebenden und wassermeidenden Aminosäurebausteinen ließ sich schon 1992 ableiten, dass sich die Eiweißkette des Opsins in sieben langgestreckten Helices zwischen der Innen- und der Außenseite der Membran hin- und herschlängelt. Allerdings gelang es erst vor einem halben Jahr, diese Prognose durch die Ermittlung der hochaufgelösten Kristallstruktur des dem menschlichen Protein nahe verwandten Rinderrhodopsins zu bestätigen und mit wichtigen Details zu ergänzen; denn Membranproteine sind notorisch schwierig zu kristallisieren.

Genau in der Mitte des fassartigen Raums, den die sieben Helices bilden, sitzt das Retinal. Dieses kleine Molekül ist die Antenne, die das Licht einfängt. Während es im inaktiven Dunkel-Zustand einen markanten Knick in seiner Molekülkette aufweist (cis-Form), geht es nach Aufnahme eines Lichtquants in die langgestreckte trans-Form über. Dieses Umklappen löst Verschiebungen in der Struktur des Opsins aus, die sich bis zu seiner dem Zell-Inneren zugewandten Seite fortpflanzen.

Steckbrief

- ➤ Molekulargewicht: 38 892
- ➤ Aminosäuren: 348
- ➤ 7-Helix-Bündel
- ➤ Photorezeptor
- ➤ Chromosom Nr. 3



K. PALCZEWSKI ET AL., SCIENCE, BD. 289, S. 740

Die sieben Helices des Rhodopsins, die sich durch die Membran der Netzhautzellen schlängeln, bilden eine Art Fass, in dessen Mitte der Lichtrezeptor Retinal sitzt.

Dort kommt es innerhalb weniger Millisekunden zu einer kaskadenartigen Verstärkung des Signals über drei Stationen. Zunächst wird Transducin aktiviert. Es gehört zur großen Familie der G-Proteine, die darauf spezialisiert sind, eingehende Botschaften in das Zell-Innere weiterzuleiten. Transducin „entsichert“ dann das Enzym Phosphodiesterase, und dieses spaltet schließlich den Botenstoff cyclisches Guanosin-monophosphat, der normalerweise so genannte Natriumkanäle in der Zellmembran offen hält. Die Kanäle schließen sich folglich, wodurch sich die Ladungsverteilung zwischen Innen- und Außenseite der Zelle ändert: Ein Membranpotenzial entsteht, und aus dem Lichtreiz ist ein elektrisches Signal geworden, das nun von Nervenzellen weitergeleitet werden kann.

Einige Sekunden nach dem Umklappen löst sich das trans-Retinal vom Opsin. Im Dunkeln geht es dann wieder in die geknickte cis-Form über und bindet sich schließlich erneut an ein Opsin-Molekül: Der Kreislauf kann von vorne beginnen.

Rhodopsin gehört zu einer großen Klasse von mehr als tausend Membranproteinen, die alle die empfangene Nachricht an ein G-Protein weiterreichen. Sie dienen nicht nur als Signalwandler für die meisten Sinneswahrnehmungen, sondern auch als Rezeptoren für Hormone und andere wichtige Botenstoffe. Insgesamt machen sie über ein Prozent der menschlichen Gene aus. Da die Kristallstruktur des Rhodopsins erste detaillierte Einblicke in den räumlichen Aufbau eines solchen zellulären „Nachrichtenempfängers“ lieferte, geht ihre Bedeutung weit über das Verständnis des Sehvorgangs hinaus. Ihre genaue Analyse dürfte Erkenntnisse erbringen, die Analogieschlüsse und Vermutungen über viele andere, ebenso wichtige Signalwege erlauben.

EVOLUTION DES VERHALTENS

Freigebigkeit lohnt sich

Anderen zu helfen kann sich durch Imagegewinn indirekt bezahlt machen. Das bestätigen nach Computersimulationen nun auch reale Experimente.

Von Manfred Milinski

Wer gibt, dem wird gegeben". So steht es in der Bibel; allerdings lässt das Bibelwort offen, ob die Belohnung schon auf Erden oder erst im Jenseits erfolgt. Dass sich Geben für den Geber auszahlt, kann man erwarten, wenn „eine Hand die andere wäscht" oder wenn gilt: „Wie du mir, so ich dir". Falls die Hilfe weniger kostet als sie dem Geholfenen bringt, können beide profitieren, sofern sich der Empfänger entsprechend erkenntlich zeigt.

Für solchen reziproken Altruismus gibt es viele Beispiele bei Menschen und Tieren. Unser gesamtes Wirtschaftswesen basiert darauf; denn bei jedem Geschäft gehen beide Parteien davon aus, dass es für sie vorteilhaft ist. Um diese „direkte" Reziprozität zu erleichtern, haben unsere Vorfahren das Geld als leicht abzustufende Gegenleistung erfunden. Kann es sich aber auch lohnen, jemandem zu helfen, von dem keine Gegenleistung zu erwarten ist?

Schon seit Jahrzehnten diskutieren Evolutionsbiologen die Idee, dass selbstlose Hilfe den „Status" einer Person aufwertet und dass ein höherer Status Vertrauen und Vorteile in vielen sozialen Situationen nach sich ziehen kann. Bis vor kurzem gab es allerdings keinen Beweis für diese These. Spieltheoretisch betrachtet, lautet die Kernfrage: Würde sich in der Evolution die Strategie durchsetzen, bevorzugt diejenigen zu unterstützen, die selbst schon anderen geholfen haben?

Im Jahre 1998 konnten Martin Nowak von der Universität Oxford und Karl Sigmund von der Universität Wien zeigen, dass die theoretische Antwort „ja" lautet (Spektrum der Wissenschaft 9/98, S. 30). Mit einem mathematischen Evolutionsmodell und Computersimulationen gelang ihnen der Nachweis, dass sich unter realistischen Bedingungen in einer Population tatsächlich die ererbte Tendenz einbürgern kann, vor allem denjenigen zu geben, die als großzügig bekannt sind.

Evolution der Großzügigkeit im Computer

Nowak und Sigmund simulierten einen Evolutionsverlauf mit beispielsweise hundert Spielern, die Hilfe geben oder empfangen konnten, aber nie auf dasselbe Gegenüber mit vertauschten Rollen trafen – direkte Reziprozität war ausgeschlossen. Generell war die Hilfe für den Empfänger mehr wert, als sie den Geber gekostet hat. Das ist eine plausible Annahme, auch wenn man nicht gleich an die Rettung eines Ertrinkenden denkt, die den Retter nur die Armbewegung kostet, mit der er den Rettungsring wirft.

Die virtuellen Spieler im Computer hatten einen erkennbaren „Geberstatus", der zu Beginn ihres Daseins jeweils „null" betrug. Jede geleistete oder unterlassene Hilfe ließ ihn um einen Punkt steigen oder fallen. Die simulierten Individuen richteten sich bei ihren Entscheidungen nach vererbbaren Helferstrategien, die von –5 bis +6 reichten. Ein Spieler mit einer –5-Strategie hilft jedem, der einen Geberstatus von mindestens –5 hat, also fast allen. Ein Individuum mit einer +6-Strategie unterstützt dagegen nur solche Mitspieler mit einem Geberstatus von mindestens +6, also fast niemanden. Die 0-Strategie unterscheidet am stärksten zwischen Helfern und Verweigerern. Ein solcher Spieler gibt jedem, der mindestens genauso oft Hilfe gewährt wie verweigert hat. Jede Strategie bekam entsprechend ihrem Nettogewinn – dem Wert der erhaltenen Hilfe abzüglich der Kosten durch geleistete Hilfe – Nachkommen in der nächsten Generation.

Auf diese Weise sollte sich in einem „natürlichen" Selektionsprozess schließlich diejenige Helferstrategie durchsetzen, deren Spieler den höchsten Nettogewinn erzielten. Welche wäre es? Nach 150 Generationen bestand die Computerpopulation fast nur noch aus Spielern mit der 0-Strategie, die am klarsten zwischen ▶

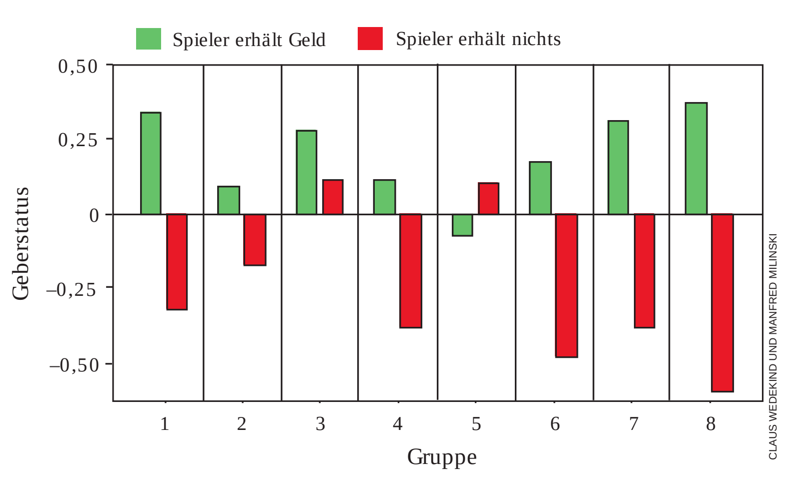
In einem Experiment an der Universität Bern mussten in acht Gruppen jeweils zehn Studenten mehrfach entscheiden, ob sie einem anonymen Gruppenmitglied, dessen „Geberstatus" an der Tafel angeschlagen war, Geld geben oder nicht. Damit sie selbst ebenfalls anonym blieben, teilten sie ihre Entscheidung über verdeckte Schalter mit, die entweder eine grüne („ja") oder eine rote Lampe („nein") vor dem Spielleiter aufleuchten ließen.



CLAUS WEDEKIND UND MANFRED MILINSKI

positivem und negativem Geberstatus unterscheidet. Wenn der Bekanntheitsgrad variiert wurde, war dieses Ergebnis umso ausgeprägter, je genauer der Geberstatus der Empfänger bekannt war. Sofern andere die guten Taten mitbekommen, gilt also wirklich – zumindest im Computermodell: Wer gibt, dem wird gegeben. Daraus folgt die Maxime: „Tue Gutes und rede darüber.“

Ist das nur graue Theorie, oder verhalten sich Menschen tatsächlich so? Um diese Frage zu testen, führten Claus Wedekind von der Universität Edinburgh und ich ein Experiment mit 80 Studierenden an der Universität Bern durch (*Science, Bd. 288, S. 850-852*). Jeweils zehn Versuchspersonen saßen für eine Stunde zusammen in einem Raum und wurden einzeln gefragt, ob sie einem zufällig bestimmten anderen Gruppenmitglied einen Franken geben wollen. War die Antwort „ja“, wurde ihnen der Franken (in einigen Gruppen auch zwei) vom Konto abgezogen, und der Empfänger erhielt vier Franken, damit Hilfe mehr einbringt, als sie kostet. Jede Person kam insgesamt sechsmal sowohl in der Geber- als auch in der Nehmerrolle an die Reihe.



Die Teilnehmer des Experiments waren großzügigen Mitspielern gegenüber freigebiger. Wie das Diagramm belegt, hatten in allen acht Gruppen Studierende, die Geld erhielten (grüne Säulen), im Durchschnitt einen höheren Geberstatus als solche, die nichts bekamen (rote Säulen).

Geberstatus spielt eine Rolle

Theoretisch konnte jemand, der nie gab, aber immer etwas erhielt, mehr als 30 Franken verdienen. Die Studenten wussten, dass sie nie auf dieselbe Person mit vertauschten Rollen treffen würden – direkte Reziprozität war wie im Computermodell ausgeschlossen. Um auch zu verhindern, dass der tatsächliche persönliche Status der Teilnehmer eine Rolle spielen konnte, erhielten sie Pseudonyme und teilten ihre Entscheidungen über verdeckte Schalter mit. Immer zwei Pseudonamen wurden als potenzieller Geber und Empfänger aufgerufen. Der Geberstatus jedes Mitspielers stand für alle sichtbar unter seinem Pseudonym auf einem großen Protokollblatt an der Tafel und wurde nach jedem Zug aktualisiert.

Alle wussten, dass auch nach dem Spiel und bei der Auszahlung die Anonymität gewahrt bliebe – nicht einmal die Spielleiter kannten die wahre Identität der Spieler. Würden die Studenten unter diesen Umständen überhaupt irgendetwas geben? An sich macht es ja keinen Sinn, jemandem etwas zu spenden, von dem keine Gegenleistung zu erwarten ist; konsequente Verweigerer könnten ihr Startgeld von sieben Franken sicher mit nach Hause nehmen.

Wenn die Spieler aber trotzdem etwas gaben, würden sie ihr Geld dann zufällig über die anonymen Mitspieler verteilen oder in Einklang mit den Ergebnissen der Computersimulation von Nowak und Sigmund diejenigen bevorzugen, die sich ihrerseits freigebig zeigten? Natürlich wurden die Studenten nicht über diese Theorie informiert, sondern nur über die Spielregeln.

Auch ohne Aussicht auf direkte Gegenleistung erwiesen sich die anonymen Spieler als erstaunlich großzügig: Die Spendenbereitschaft schwankte in den acht Gruppen zwischen knapp 50 und über 80 Prozent. Mithin wurde sehr häufig gegeben, aber auch recht oft die Unterstützung verweigert. Das bot gute Voraussetzungen, um feststellen zu können, ob bei der Hilfsbereitschaft der Geberstatus des Empfängers eine Rolle spielt.

Das Resultat war eine klare Bestätigung der Computersimulation. Die Studenten spendeten tatsächlich bereitwilliger, wenn der potenzielle Empfänger einen höheren Geberstatus hatte (Bild). Besonders galt das für die Spieler, die mit ihren Franken geizten: Sie gaben nur den großzügigsten Mitspielern etwas.

Allerdings verfolgten die Versuchsteilnehmer über die sechs Runden hinweg nicht so konsequent eine bestimmte Helferstrategie wie ihre virtuellen Pendants. Das Experiment war zu kurz, um individuelle Verhaltenskriterien feststellen zu können. Inwieweit Menschen wirklich konsistente Helferstrategien haben, ließe sich nur in Spielen herausfinden, die über sehr viel mehr Runden laufen. Die Tatsache, dass schon ganz am Anfang, als alle den Geberstatus 0 hatten, häufig gegeben wurde, könnte allerdings bedeuten, dass die von Nowak und Sigmund vorausgesagte 0-Strategie tatsächlich vielfach angewandt wird.

Der finanzielle Erfolg der verschiedenen Spielweisen lässt sich einfach beschreiben: Zwar erhielten die Großzügigen deutlich mehr als die Knauserigen; da sie andererseits auch mehr gaben, war ihr Nettogewinn aber nicht unbedingt sehr viel höher. Vielleicht bringt ein hoher Geberstatus zusätzliche Vorteile wie Vertrauen und Einfluss, die sich nicht direkt in Franken oder Mark bemessen lassen.

Das Evolutionsspiel mit den Berner Studierenden war ein Experiment, das unter künstlichen, streng kontrollierten Bedingungen durchgeführt wurde. Dennoch hatte es einen Bezug zur Wirklichkeit: Es ging um richtiges Geld, das man weggeben oder behalten konnte. Die Teilnehmer des Spiels haben erstmals vorgeführt, dass indirekte Reziprozität, die den Geberstatus des Empfängers berücksichtigt, das Verhalten von Menschen beeinflussen kann. Das ist eine wichtige Erkenntnis. Anders als die direkte Reziprozität, die auf Zweierbeziehungen beschränkt ist, ermöglicht die indirekte Reziprozität nämlich auch Kooperation in größeren Gruppen. Dabei erfordert sie, den Status aller Gruppenmitglieder ständig zu beobachten und die eigene Reputation zu pflegen. Dazu gehört nicht nur Vorausplanung – auch Täuschung und Manipulation sind möglich und müssen als Risiko von jedem kalkuliert werden. Dies könnte, wie Nowak und Sigmund meinen, eine starke evolutionäre Kraft gewesen sein, die unsere Intelligenz mitgeformt hat. ■

***Prof. Dr. Manfred Milinski** leitet die Abteilung Evolutionsökologie am Max-Planck-Institut für Limnologie in Plön.*

Flatternder Faden

Warum Fahnen im Wind flattern ist eines der schwierigsten ungelösten Rätsel der Physik. Jun Zhang und seine Mitarbeiter an der New York University haben es experimentell auf den einfachsten Fall reduziert: einen 0,15 mm dicken und 2–6 cm langen Faden in einem strömenden Seifenfilm. Überraschenderweise fanden sie, dass der Faden unterhalb einer kritischen Länge gestreckt bleibt (unten). Wie die Interferenzaufnahmen zeigen, bildet sich an seinem Ende eine Serie aus Wirbeln mit alternierendem Drehsinn. In der analogen Schleppe des flatternden Fadens drehen sich benachbarte Wirbel dagegen meist in derselben Richtung (rechts).



JUN ZHANG, NEW YORK UNIVERSITY

Science and Fun

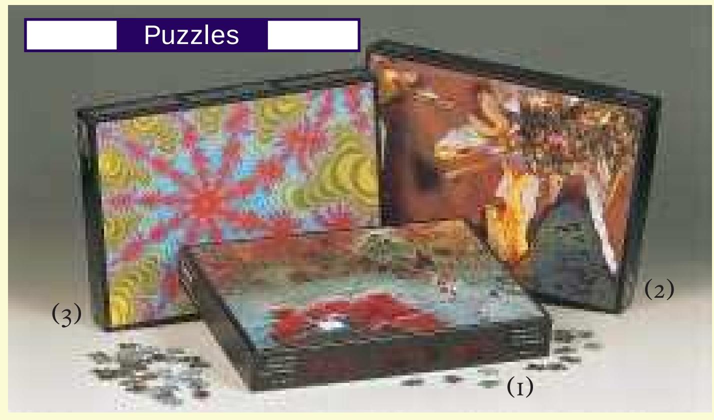
Spektrum DER WISSENSCHAFT

Raumstation ISS



Der Bau der Internationalen Raumstation ISS wird das größte von Menschenhand geschaffene Objekt außerhalb der Erde darstellen. Die Raumstation wird erst in einigen Jahren fertig gestellt sein. Sie können aber schon jetzt aus 183 Einzelteilen im Maßstab 1:144 Ihre eigene Raumstation realisieren (745 mm Länge, 500 mm Spannweite, 406 mm Höhe). Der Modellbaukasten enthält u. a. Aluminium-Vierkantstäbe zur Unterstützung der Konstruktion, Displayständer mit Erdhalbkugel, bewegliche Sonnenpanele, 2 Sojuz-Transportraumschiffe, 3 Roboterarme; **DM 49,90.**

Puzzles



Eruption (1), **Kristall** (2), **Tiefenrausch** (3), Format 49,7 × 69,7 cm, je 1000 Teile. Exklusiv von Ravensburger gefertigt; je **DM 39,80.**

Eisenmeteorit



Authentischer „Zeitzeuge“: Eisenmeteorit aus Namibia, eingegossen in Acrylglas, mit bestätigtem, nummeriertem Zertifikat. Der beiliegende Prospekt gibt Auskunft über Geschichte und Herkunft. Maße: 70×70×70mm; **DM 170,–.**



Rush Hour Railroad

Loks und Waggons werden entsprechend der Spielkarten aufgestellt. Wer kann die rote Lok in die Ausfahrt lotsen? Von 50 Aufgaben sind 10 von Kindern ab 6 Jahren zu lösen; **DM 55,–.**



T-Shirt „Auge“

100 % Baumwolle, Größe XL, **DM 29,–.**



Nussknacker „Steinschlag“

Mit diesem Design-Nussknacker knacken Sie selbst die härtesten Nüsse. Holzsockel 9 × 9cm, Höhe 26 cm; **DM 84,–.**

Junior Wissen



Mikroskop „Tasco“

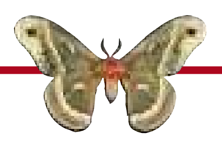
Das Mikroskop hat ein Zoomobjektiv von 10x-20x. Die drei Linsen des Objektrevolvers ermöglichen eine bis zu 900-fache Vergrößerung; **DM 109,–.**

Hamsterrolle

Die Hamsterrolle ist ein waghalsiger Nervenkitzel für 2–4 Ringgeister und Rundbauarchitekten ab 6 Jahren. Atemlose Drehmomente, unglaubliche Topspin-Effekte und sagenhafte Zitterpartien sorgen dafür, dass es ständig rund geht; **DM 74,–.**



Informations- und Bestellservice →



ÖKOLOGIE

Fehlgeleitete biologische Schädlingsbekämpfung

Mit einer Flügelspannbreite von 15 Zentimetern ist der Cecropiaspinner Nordamerikas größter Nachtfalter. Doch sein Bestand ist in den letzten hundert Jahren drastisch zurückgegangen. George Boettner und seine Kollegen von der Universität von Massachusetts in Amherst glauben nun den Grund dafür gefunden zu haben. Danach ist der Falter das Opfer einer Maßnahme zur ökologischen Schädlingsbekämpfung im 19. Jahrhundert. Damals verursachte der Schwammspinner große Schäden in amerikanischen Laubwäldern. Um ihn einzudämmen, importierten die betroffenen Bundesstaaten einen natürlichen Feind der Schmetterlinge: die zu den Raupenfliegen gehörende Art *Compsilura concinnata*. Doch die Fliege legt ihre Eier in die Raupen von mindestens 180 Insektenarten – darunter auch die des Seidenspinners. Wie sehr dieser betroffen ist, belegten die US-Forscher in einem Experiment, bei dem sie Raupen des Nachtfalters an bestimmten Plätzen aussetzten und nach einer Woche wieder einsammelten. 81 Prozent dieser Tiere waren von der Fliege befallen und starben. Das breite Wirkungsspektrum von *C. concinnata* wird wohl vielen Schmetterlingsarten in den Wäldern der Vereinigten Staaten zum Verhängnis. Mindestens vier Arten der Seidenspinner gelten in Massachusetts bereits als bedroht.



Unabsichtliches Opfer: der Cecropiaspinner

JIM KALISCH, UNIVERSITY OF NEBRASKA, DEPARTMENT OF ENDOMOLOGY

ASTROPHYSIK

Anstößige Neutrinos

Manche Neutronensterne, die als Endprodukte von bestimmten Supernovae entstehen, wandern mit ziemlicher Geschwindigkeit durchs All. Doch was hat ihnen ihren Schub verliehen? Eine gängige Theorie unter Astrophysikern sieht den umtriebigen Stern als ehemaligen Partner eines Doppelstern-Systems. Wenn er im Verlauf der Supernova-Explosion seine äußere Hülle absprengt, verschieben sich die Gravitationskräfte zwischen beiden Partnern, sodass beide ihre Bewegungsrichtung ändern. Herman Mosuera Cuesta vom brasilianischen Forschungszentrum für Physik in Rio de Janeiro hat nun eine andere Hypothese aufgestellt. Danach würden die bei einer Supernova entstehenden Neutrinos nicht, wie bisher angenommen, im Kern festgehalten, sondern durch Oszillation in so genannte sterile Neutrinos umgewandelt. Deren Freisetzung wiederum erfolge nicht immer symmetrisch, sondern könne dem Neutronenstern einen Impuls erteilen und ihn so in Bewegung setzen. Zwar konnte bislang noch niemand die Existenz der hypothetischen sterilen Neutrinos beweisen. Doch ihre stark richtungsabhängige Emission böte zugleich eine Erklärung für Unregelmäßigkeiten in der expandierenden Hülle von Supernovae. *(The Astrophysical Journal, Bd. 544, S.61)*

CHEMIE

Widerstandsloser Fußball

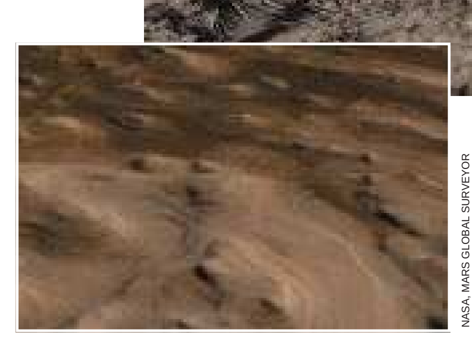
Supraleiter transportieren Strom ohne Widerstand und somit verlustfrei – allerdings nur unterhalb ihrer so genannten Sprungtemperatur, die bei supraleitenden Metallen maximal –250 °C beträgt. Die notwendige starke Kühlung schränkt praktische Anwendungen erheblich ein. Zwar wurden vor 15 Jahren Kupferoxidkeramiken entdeckt, die teilweise schon ab –140 °C Strom widerstandslos leiten, aber sie sind spröde und lassen sich nur schlecht verarbeiten. Nun hat das Team um Bertram Batlogg von den Bell Laboratorien in Murray Hill (New Jersey) einen neuen Kandidaten für einen Hochtemperatur-Supraleiter gefunden: das wohlbekannte Fulleren, dessen fußballartige Struktur aus 60 Kohlenstoff-Atomen besteht. Schon vor zehn Jahren erwies sich, dass es beim Dotieren mit Alkalimetallen, was dem Zufügen von Elektronen entspricht, supraleitend wird – mit Sprungtemperaturen bis –240 °C. Batlogg und seine Kollegen verfolgten nun die umgekehrte Strategie: Sie entfernten elektrochemisch mehrere Elektronen aus dem C-60-Molekül. Hierbei erreichten sie mit drei fehlenden Elektronen je Fulleren die höchste Sprungtemperatur: –221°C. Nach theoretischen Abschätzungen der Wissenschaftler sollte eine weitere deutliche Steigerung möglich sein, wenn es gelingt, die „Fußbälle“ durch Einbau zusätzlicher Atome auseinander zu drücken. *(Nature, Bd. 408, S. 549)*

SCIENCE

PLANETOLOGIE

Noch mehr Wasserspuren auf dem Mars

Gab es früher Wasser auf dem Roten Planeten? Dieser Frage gehen Astronomen mit brennender Neugierde nach, da es die Voraussetzung für mögliches Leben ist. Neueste Aufnahmen der Nasa-Sonde Mars Global Surveyor zeigen nun Sedimente in vielen Kratern des Planeten, deren gleichmäßige Schichtung darauf hindeutet, dass sie von Wasser abgelagert wurden. Wie Michael Malin und Kenneth Edgett von Malin Space Science Systems in San Diego (Kalifornien) nach Auswertung der Bilder vermuten, wurden die Sedimente bei regelmäßigen Überflutungen in die Seen geschwemmt, die vor 3,5 bis 4 Milliarden Jahren die Krater füllten. Dort setzten sie sich in dünnen Schichten ab, die sich verfestigten, wenn die Gewässer dann ruhten. Allerdings fehlen Rinnen und Kanäle, durch die das Wasser in die Seen geflossen sein könnte. Möglicherweise hat die Erosion ihre Spuren verwischt. *(Nature, Bd. 408, S. 549)*



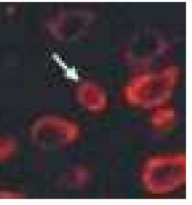
Solche gleichmäßig geschichteten Sedimente können nur in Seen enstanden sein.

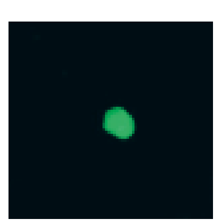
NASA, MARS GLOBAL SURVEYOR

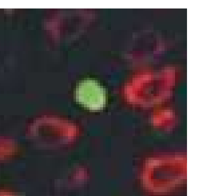
MEDIZIN

Gehirn aus Knochenmark

Embryonale Stammzellen gelten als Alleskönner, da sie noch ihr gesamtes genetisches Programm abrufen und sich somit in alle Zelltypen entwickeln können. Doch zwei neue Arbeiten erhärten frühere Befunde, wonach sich auch so genannte pluripotente Stammzellen ausgewachsener Tiere, wie Knochenmarks- und Leberzellen, im Organismus je nach Umgebung in unterschiedliche Zelltypen ausdifferenzieren. Eva Mezey und ihre Kollegen vom nationalen Institut für neurologische Erkrankungen und Schlaganfall in Bethesda (Maryland) injizierten genetisch veränderten Mäusen, die keine weißen Blutkörperchen bilden konnten, mit Fluoreszenzfarbstoff markierte Knochenmarkszellen erwachsener Artgenossen. Vier Monaten nach der Behandlung fand das Team die fluoreszierenden Zellen in verschiedenen Regionen des Gehirns – unter anderem im Cortex und Hypothalamus. Zu ähnlichen Ergebnissen kam ein Team von Helen Blau von der Universität Stanford, das ebenfalls Knochenmark übertrug. Auch hier erreichten die injizierten Zellen das Gehirn und integrierten sich sowohl in der Großhirnrinde als auch in Riechkolben, Hippocampus und Kleinhirn. Dass die Zellen nicht nur ins Gehirn einwandern, sondern sich dort auch zu funktionsfähigen Nervenzellen entwickeln und Synapsen ausbilden, eröffnet aufregende neue Möglichkeiten, verloren gegangene Nervenzellen bei neurologischen Erkrankungen wie Parkinson oder Alzheimer zu ersetzen. *(Science, Bd. 290, S. 1775 und 1779)*







Eine ins Gehirn gewanderte Knochenmarkszelle (Pfeil/grün) produziert Neuron-spezifische Proteine (rot).

PALÄONTOLOGIE

Gefiederte Echsen und Urvögel aus China

Die Abstammung der Vögel ist bis heute umstritten. Nun liefern zwei neue Fundstücke aus China weitere Hinweise darauf, dass sie sich aus Dinosauriern entwickelten. Xing Xu vom Institut für Paläontologie und Paläanthropologie der Wirbeltiere in Peking stellte das 124 Millionen Jahre alte Fossil eines Tiers von der Größe einer Krähe vor, dessen Krallen wie bei baumbewohnenden Vögeln, die auf Ästen sitzen, gebogen waren. *Microraptor zhaoianus*, so sein Name, ist der kleinste bisher bekannte Vertreter der Theropoden, der auf zwei Beinen laufenden Saurier, die vor 230 bis 64 Millionen Jahren lebten. Mit seinem langen Schwanz und als Federn gedeuteten Strukturen könnte er die Lücke zwischen ihnen und den Vögeln weiter einengen. Neue Erkenntnisse über die Entstehung der Federn lieferte der Fund von *Protopteryx fengningensis*. Er lebte in der frühen Kreidezeit und gehörte den damals weit verbreiteten *Enantiornithinen* an – einer Vogellinie, die inzwischen ausgestorben ist. Laut Fucheng Zhang und Zhonghe Zou, die das Fossil entdeckten, soll der starengroße Vogel seine Federn in erster Linie zur Isolierung, aber auch für Flugversuche genutzt haben. Die beiden Forscher kommen zu dem Schluss, dass sich die Vogelfeder vor 100 Millionen Jahren in vier Evolutionsschritten aus der Dinosaurier-Schuppe entwickelte, indem sich erst die Schuppe verlängert und dann ein Mittelschaft gebildet hat. Anschließend entstanden Seitentriebe. Die Entwicklung vieler kleiner Triebe bildete den Abschluss zur Vogelfeder. *(Nature, Bd. 408, S. 705, Science, Bd. 290, S. 1955)*



SCIENCE

Als Federn gedeutete Struktur (rechts) bei *Protopteryx* (links)

ZOOLOGIE

Winzling der Extraklasse

Im kalten Quellwasser von Grönland entdeckten die Zoologen Reinhardt Kristensen von der Universität Kopenhagen und Peter Funch von der Universität Aarhus ein winzig kleines Tierchen, das sich in keine der vorhandenen Klassen einordnen lassen wollte. *Limnognathia maerski*, wie sie es nannten, weist einen kompliziert gebauten Kiefer auf, was seine Zugehörigkeit zu den Kiefermündern nahe legt. Sein Nierensystem hingegen ähnelt dem der mikroskopisch kleinen Rotarien oder Rädertierchen. So gründeten die Zoologen mit ihrem kälteresistenten Findling eine neue Klasse: die Micrognathozoa (Kleinkiefertiere). Der nur 0,1 Millimeter große Winzling hat noch eine Besonderheit zu bieten. Bislang entdeckten die Zoologen nur Weibchen. Möglicherweise pflanzt sich der Neuling durch eingeschlechtliche Vermehrung fort. Eine solche Parthenogenese ist bei den Rädertierchen bekannt – allerdings nur im Wechsel mit zweigeschlechtlicher Fortpflanzung. Ob *Limnognathia* wirklich ganz ohne Männchen auskommt, wird sich erst bei Züchtungsversuchen zeigen. *(Journal of Morphology, Bd. 246, S. 1)*





REINHARDT KRISTENSEN, PETER FUNCH

Dieser Exot passt in kein konventionelles Schema.

Kosmischer Staub

Die Abfallprodukte von Sternexplosionen, winzige Staubkörner im interstellaren Raum, haben die Geschichte unserer Galaxis entscheidend beeinflusst.

VON J. MAYO GREENBERG

ANGLO-AUSTRALIAN OBSERVATORY/ROYAL OBSERVATORY, EDINGBURGH



Der Pferdekopfnebel (oben) ist eine riesige Wolke aus Staub und Gas im Sternbild Orion, etwa tausend Lichtjahre von der Erde entfernt. Der helle Stern auf der gegenüberliegenden Seite ist Zeta Orionis, der östliche Stern im Gürtel des Orion.

Blickt man in einer klaren Nacht zum Sternenhimmel, so zeigen sich in dem von Milliarden von Sternen schwach schimmernden Band der Milchstraße einige dunkle Flecken. Sir William Herschel, aus Deutschland stammender, in England tätiger Astronom im 18. Jahrhundert, sah in diesen Flecken regelrechte Löcher im Himmel, leere Räume ohne Sterne.

Anfang des 20. Jahrhunderts entdeckten Astronomen, dass diese dunklen Flecken in Wirklichkeit riesige Staubwolken sind, die das Licht der dahinterliegenden Sterne verschlucken. Die einzelnen Partikel dieser Wolken sind dabei winzig klein: über hundertmal kleiner als der Staub, den man etwa beim Hausputz aufwischt. Und doch haben solche winzigen Staubkörnchen die Entwicklung unserer Galaxis und die Entstehung von Sternen im gesamten Universum entscheidend beeinflusst.

Noch bis in die fünfziger Jahre war der kosmische Staub für viele Astronomen ein Ärgernis, da er sie vor allem an der Beobachtung entfernterer Sterne hinderte. Seitdem beschäftigen sich Wissenschaftler jedoch verstärkt mit den interstellaren Staubkörnern, messen deren Verteilung und bestimmen ihre chemische Zusammensetzung mit Teleskopen auf der Erde und im Weltraum. Die Fülle neuer Beobachtungen und Erkenntnisse ermöglichte es, plausible Hypothesen zu entwickeln, wie diese Staubteilchen entstanden sein könnten. Aigen Li, ein früherer Student von mir und derzeit Postdoc an der Universität Princeton, hat zusammen mit mir eine Theorie entwickelt, die wir das „Vereinheitlichte Staubmodell“ nannten. Auch wenn andere Forscher alternative Thesen unterstützt haben, glauben wir, dass unser Modell die neuen Beobachtungen am besten beschreibt.

Kosmische Teilchen so groß wie Partikel im Zigarettenrauch

Im Sternengewirr unseres Milchstraßensystems sind die Staubwolken in der galaktischen Ebene konzentriert, besonders an den Innenseiten der Spiralarme. Diese erscheinen ziemlich fleckig, weil dort viele dichte Sternhaufen in Staubwolken eingebettet sind. Diese Wolken dämpfen das Sternenlicht stärker im Blauen und Ultravioletten als im Roten und Infraroten. Deswegen erscheinen sie bei Beobachtungen durch Staubwolken hindurch immer rötlicher als in Wirklichkeit. Aus dem gleichen Grund wirkt unsere Sonne in Horizontnähe beim Auf- oder Untergang rötlich, da ihr Licht vom Staub und Gas in der Erdatmosphäre gestreut wird.

Die größten der interstellaren Staubpartikel haben etwa die Größe der Teilchen im Zigarettenrauch. Die so genannte Extinktionskurve des interstellaren Staubes, also die Dämpfung des Lichts in Abhängigkeit von der Wellenlänge, weist auf drei Arten von Staubkörnern hin (siehe Kasten Seite 33). Die Teilchen, die das Licht im sichtbaren Bereich des Spektrums abschirmen, sind länglich mit etwa 0,2 Mikrometer Durchmesser (0,2 Millionstel eines Meters) und etwa der doppelten Länge. Sie bilden etwa 80 Prozent der Gesamtmasse des interstellaren Staubes.

Jedes Staubkorn enthält einen winzigen festen Kern, ummantelt von Eis und organischem Material. Ein „Buckel“ im ultravioletten Teil der Extinktionskurve weist auf das Vorhandensein wesentlich kleinerer Partikel (mit Durchmessern von 0,005 Mikrometer); aus ihnen bestehen etwa 10 Prozent der gesamten Staubmasse. Diese Körnchen sind wahrscheinlich amorphe kohlenstoffhaltige Festkörper, vermutlich angereichert mit etwas Wasserstoff, aber wenig oder keinem Stickstoff und Sauerstoff. Das hochenergetische UV-Licht schließlich wird insbesondere von den kleinsten aller kosmischen Staubteilchen absorbiert – sie sind nur etwa 0,002 Mikrometer groß. Diese winzigen Körnchen – sie bilden die restlichen 10 Prozent der kosmischen Staubmaterie – halten die Forscher für große Moleküle, vergleichbar mit polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAHs für *polycyclic aromatic hydrocarbons*) in Autoabgasen.

Weil diese Staubkörnchen zumeist in großer Entfernung zu den Sternen durchs All treiben, können sie typischerweise bis auf –268 Grad Celsius abgekühlt sein, 5 Grad über dem absoluten Nullpunkt. In den vierziger Jahren hatte der brillante holländische Astronom Henk van de Hulst die Theorie aufgestellt, dass einige der Atome wie Wasserstoff, Sauerstoff, Kohlenstoff und Stickstoff – von denen man weiß, dass sie im interstellaren Raum vorkommen – an der kalten Oberfläche der Staubkörner anhaften. So legen sich diese einen Mantel aus gefrorenem Wasser, Methan und Ammoniak zu. Ich habe diese Theorie später „Schmutziges Eis“-Modell getauft.

Erst Anfang der siebziger Jahre stießen Astronomen auf klare Beweise für diese Theorie. Bei der Analyse von Infrarotspektren von Sternenlicht, das durch interstellare Staubwolken hindurchging, entdeckten sie Absorptionslinien von Silikaten – Verbindungen aus Silicium, Magnesium und Eisen. Silikate bilden den festen Kern der kosmischen Staubteilchen. Etwa zur gleichen Zeit beobachteten Wissenschaftler im Infrarotlicht die Absorptionslinien von gefrorenem Wasser. Spätere Beobachtungen zeigten auch die Präsenz von Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Formaldehyd und vielen anderen Verbindungen. Im Fachjargon heißen diese Substanzen „volatil“ (flüchtig) – sie gefrieren beim Kontakt mit den kalten Staubkörnern, verdampfen aber wieder, sobald sich der Staub erwärmt. Im Gegensatz dazu werden die Substanzen im Innern als „refraktär“ bezeichnet – sie bleiben auch bei höheren Temperaturen im festen Zustand.

Rund ein Promille trägt der interstellare Staub zur Gesamtmasse unserer Galaxis bei – vermutlich mehr als das Hundertfache der Masse aller Planeten des Milchstraßensystems zusammen. Die Partikel sind im Weltraum äußerst dünn verteilt: In einem Würfel von hundert Metern Kantenlänge befindet sich im Mittel gerade ein Körnchen. Da das Sternenlicht aber Tausende von Lichtjahren durch Staub zurücklegt, kann sogar diese hochverdünnte Verteilung die Strahlung noch deutlich dämpfen. Also stellt sich die Frage: Wodurch wurde die Galaxis so staubig?

Am Anfang war der Kosmos staubfrei

In der Anfangszeit unseres Universums, vor vielleicht 15 Milliarden Jahren, gab es nach gängiger Theorie noch keinen Staub. Wie alle jungen Galaxien bestand auch das Milchstraßensystem damals nur aus Wasserstoff, Helium und einer geringfügigen Menge anderer leichter Elemente, die beim Urknall entstanden waren. Damals konnten nur besonders schwere (massereiche) Wolken aus Wasserstoff und Helium kontrahieren und so die Sterne bilden. Deshalb wurde unsere Galaxie von gigantischen Sternen des so genannten O- und B-Typs dominiert, die bereits nach einer kurzen Lebensspanne von einigen Millionen Jahren als „Supernovae“ explodierten. Diese Supernovae produzierten den ersten Staub des Universums. Astronomen sehen die Anzeichen davon in frühen Galaxien, die sie mit Infrarot-Teleskopen im Submillimeterbereich beobachten. Aber dieser Staub hatte im interstellaren Medium nicht lange Bestand – Stoßwellen nachfolgender Supernovae zerstörten die Staubteilchen kurz nachdem sie entstanden sind.

Nach fünf Milliarden Jahren flaute jedoch der Sturm dieser Supernovae ab. Stattdessen traten nun auch weniger massereiche Sterne in ihre Altersphase, das so genannte Rote-Riesen-Stadium, ein: Sie blähten sich auf, kühlten dabei ab und strahlten fortan vor allem im rötlichen Licht. Als diese Sterne sich weiter ausdehnten und abkühlten, bildeten sich in ihren Atmosphären Silikatteilchen, die in den interstellaren Raum hinausgeblasen wurden.

Einige dieser Partikel drangen in Gaswolken ein, die sich zwischen den Sternen befinden. Bei den tiefen Temperaturen in diesen Wolken fror jedes Atom oder Molekül, mit dem diese Staubteilchen kollidierten, auf deren Oberfläche fest – ähnlich wie Wasserdampf auf kalten Glasscheiben kondensiert. Auf diese Weise wuchs auf jedem der Silikatkerne zunächst ein innerer Mantel, der aus komplexem organischen Material besteht, darum gehüllt ein äußerer Eismantel bestehend aus simpleren gefrorenen Gasmolekülen.

Bei diesem Prozess nahm die Dichte der Staubkörner in den Molekülwolken beständig zu: auf zehntausendmal mehr Partikel pro Volumeneinheit als außerhalb der Wolken. Damit hatte der Staub die Dichte, um nahezu alle Strahlung am Eindringen in die Wolke zu hindern, was die Temperatur innerhalb des Gases weiter senkte. Mit der Abkühlung reduzierte sich der Gasdruck im Wolkeninneren, sodass nun die Gravitation geringerer Massen die Oberhand gewann. Somit konnten sich jetzt auch kleinere Gaswolken unter ihrer Schwerkraft zusammenziehen und kleinere, sonnenähnliche Sterne hervorbringen. Indem er die Bildung kleinerer Sterne erleichterte, veränderte der kosmische Staub also drastisch das Profil unserer Milchstraße.

Ein weiterer Faktor: Der interstellare Staub wird in einem ständigen Kreislauf umgewälzt – also laufend erzeugt und wieder vernichtet. Wenn aus dichten Gas- und Staubwolken junge, heiße Sterne entstehen, verdampfen die Staubkörner in der Umgebung dieser Zone. Silicium und andere Elemente dieser Staubkörner werden dann entweder von den jungen Sternen aufgesogen oder werden Bestandteil von ihren Planeten und Asteroiden.

Überwiegend wird der Staub jedoch weggeblasen und gelangt dabei in dünne Wolken – Regionen im Weltraum mit deutlich geringerer Teilchendichte. In dieser raueren Umgebung werden die Staubteilchen weiter vernichtet. Ihre Eismäntel werden durch ultraviolette Strahlung, Zusammenstöße der Teilchen un-

Literaturhinweise

Urzeugung aus Kometenstaub? Von J. Kissel und F. R. Krueger, Spektrum der Wissenschaft, Mai 2000, S. 64.

Erste direkte chemische Analyse des interstellaren Staubes. Von F. R. Krueger und J. Kissel, Sterne und Weltraum, Bd. 39, Mai 2000, S. 326.

Cosmic Dust in the 21st Century. Von J. M. Greenberg und Ch. Shen, Astrophysics and Space Science, Bd. 269, S. 33 (1999).

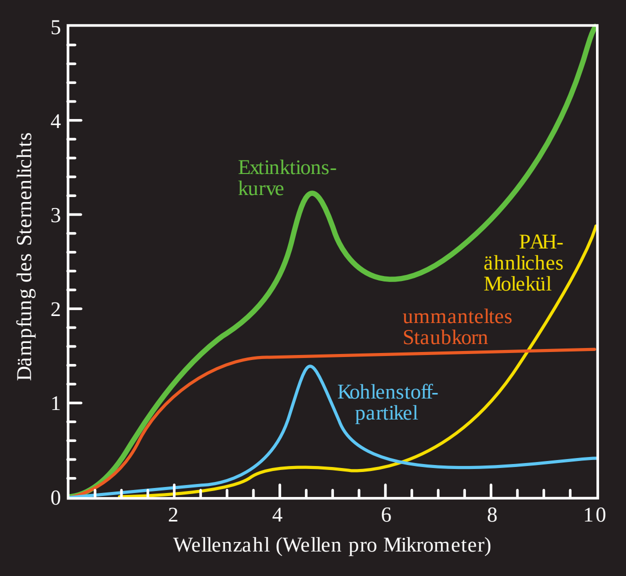
A Unified Model of Interstellar Dust. Von A. Li und J. M. Greenberg, Astron. Astroph., Bd. 323, Nr. 2, S. 566 (1997).

*Weblinks unter **www.spektrum.de/aktuellesheft.html***

Unsere staubige Milchstraße

Staubwolken wie die im Rosettennebel sind Brutstätten neuer Sterne. Die Staubkörner schirmen die Strahlung innerhalb des Gasnebels ab und machen es so für diesen einfacher, zusammenzufallen und Sterne zu bilden. Während dieses Prozesses wird der größte Teil des Staubes ins All geblasen. Messungen der Verringerung des Sternlichts, dass diese Regionen passiert (siehe unten), zeigen die Anwesenheit dreier Arten von Staubpartikeln: Staubkörnern mit Mantel, kohlenstoffhaltigen amorphen Festkörpern und großen Molekülen ähnlich den polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAHs). Die ummantelten Staubkörner verursachen die Polarisierung des Sternenlichts in allen Wellenlängen.







ANGLO-AUSTRALIAN OBSERVATORY/ROYAL OBSERVATORY, EDINBURGH (FOTO) / CLEO VILETT (GRAFIK)

tereinander und Stoßwellen der Supernovae abgetragen und teilweise sogar zerstört. Übrig bleiben dann Rudimente: Silikatkerne, umhüllt nur noch von ihrem inneren Eismantel aus organischen Molekülen.

Das Vorhandensein dieses organischen Mantels hatte ich schon vor drei Jahrzehnten postuliert. Damals war mir aufgefallen, dass die Silikate allein nicht ausreichen, um die Dämpfung des Sternenlichts zu erklären, wenn es die Staubwolken durchdringt. Ich vermutete daher, dass im Eismantel des einzelnen Staubkorns eine Schicht kohlenstoffreichen Materials durch chemische Reaktionen entsteht, die bereits einsetzen, solange sich das Staubkorn noch in den dichten Molekülwolken befindet.

Wie entsteht dieser Eismantel aus organischen Molekülen? Nach meiner Hypothese zersetzen zuerst energiereiche UV-Strahlen die Wasser-, Methan- und Ammoniakmoleküle auf der Stauboberfläche zu freien Radikalen, aus denen sich dann organische Moleküle wie Formaldehyd bilden. Unter der fortgesetzten UV-Bestrahlung entstehen komplexere Verbindungen, die wir „organische Verbindungen der ersten Generation“ nennen. Diese bleiben auf dem Silikatkern haften, auch wenn das Staubkorn die Molekülwolke verlässt und der äußere Eismantel zerstört wird. Tatsächlich schützt der organische Mantel den Silikatkern vor den Stoßwellen der Supernova und konserviert so das Staubkorn, bis es vielleicht wieder in den Schutz einer anderen dichten Gaswolke gelangt.

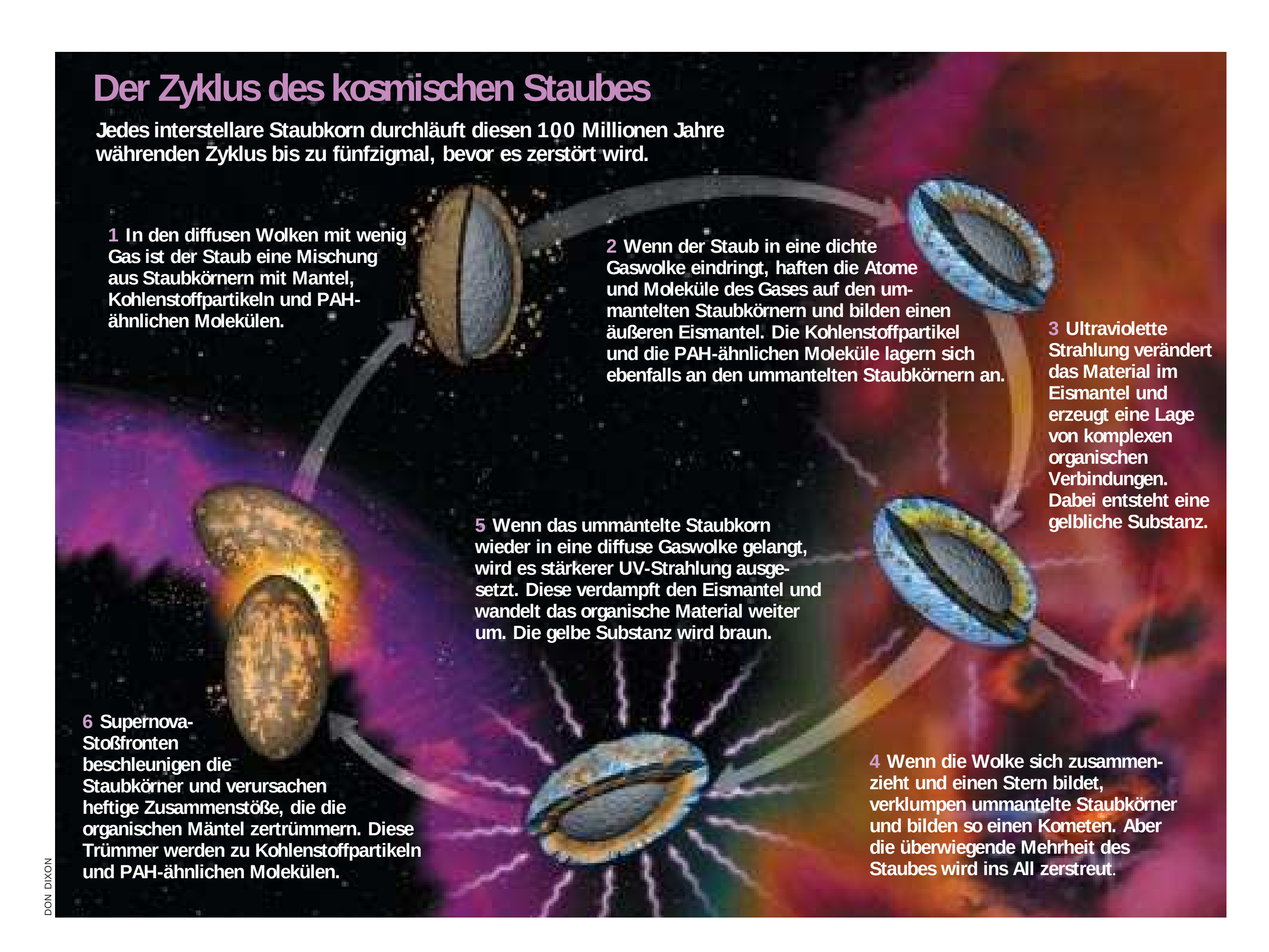
Um meine Theorie zu testen, startete ich im Labor mit Experimenten, in denen die Entstehung eines Eismantels auf Staubteilchen simuliert wurde. 1970 begannen wir diese Versuche an der Staats-Universität von New York in Albany, und setzten sie 1975 an der Universität von Leiden in den Niederlanden fort. Unsere Forschungsgruppe bestrahlte unterschiedlichste Mixturen von Eis mit ultravioletter Strahlung bei Temperaturen von –263 Grad Celsius, und erwärmte sie dann. Wir erhielten jeweils eine gelbliche Substanz, die wir „gelbes Zeug“ tauften: eine Mischung aus Glycerol, Glyceramid, einigen Aminosäuren wie Glycin, Serin oder Alanin sowie einer Reihe anderer Moleküle.

Mit dem Space Shuttle klopfte das Glück an die Labortür

Etwa zur gleichen Zeit entdeckten Astronomen Anzeichen komplexer organischer Verbindungen im Staub diffuser Wolken. Unsere Laborergebnisse konnten die beobachteten Absorptionslinien im infraroten Spektrum zwar nicht exakt reproduzieren, aber eigentlich hätte uns diese Differenz nicht überraschen sollen. In diffusen Wolken sind Staubkörner ultravioletter Strahlung ausgesetzt, die zehntausendfach intensiver ist als in den dichteren Molekülwolken. Das UV-Licht verwandelt die Substanzen des inneren Mantels in „organische Verbindungen der zweiten Generation“. Diese zusätzlichen Prozesse durch ultraviolette Strahlung erhöhter Intensität waren im Labor nur sehr schwer zu reproduzieren.

Doch dann klopfte das Glück an unsere Labortür. Gegen Ende der achtziger Jahre lud uns Gerda Horneck vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt ein, ein Satellitenexperiment namens Exobiology Radiation Assembly mitzubenutzen. Diese Plattform war dafür gebaut, biologische Proben lange Zeit einer UV-Strahlung auszusetzen. Sie bot die ideale Gelegenheit, unser „gelbes Zeug“ durch UV-Strahlung weiter zu prozessieren. Unsere Forschungsgruppe, der Menno de Groot, Celia Mendoza-Gómez, Willem Schutte und Peter Weber angehörten, bereiteten die organischen Proben vor und schickten sie mit dem Eureca-Satelliten (European Retrievable Carrier, rückholbare europäische Trägerplattform), der 1992 vom Space Shuttle ausgesetzt wurde, in den Weltraum.

Nach einem Jahr – aber nur vier Monaten tatsächlicher UV-Bestrahlung durch die Sonne – fing das Space Shuttle den Satelliten wieder ein, und wir erhielten die Proben zurück. Sie waren nun braun. Die Farbänderung bewies, dass sich die Substanzen mit Kohlenstoff angereichert hatten. Als wir dieses „braune ▶



DON DIXON

Zeug“ mit einem Infrarot-Spektrometer untersuchten, fanden wir genau die gleichen Absorptionslinien, wie sie im interstellaren Staub entdeckt worden waren.

Auch wenn unsere Proben höchstens einem Zehntel der maximalen Bestrahlung eines Staubkorns in einer diffusen Wolke ausgesetzt waren, hatten sie große Ähnlichkeit mit dem organischen Material im kosmischen Staub. Diese Experimente bildeten die Basis für das vereinheitlichte Staubmodell, das Aigen Li und ich aufgestellt hatten. Demnach bilden sich die zwei kleineren Typen interstellarer Staubkörner – die amorphen kohlenstoffhaltigen Partikel sowie die PAH-ähnlichen Moleküle – durch UV-Bestrahlung der organischen Substanzen in den größeren eisummantelten Staubkörnern.

Wir brachten unsere Probe des „braunen Zeugs“ zur Analyse zu Seb Gillette von der Universität Stanford, der über raffinierte Verfahren der Massenspektrometrie verfügte. Gillette fand in der Probe außerordentlich viel PAHs. Nach unserem vereinheitlichten Staubmodell können die chemischen Prozesse in den ummantelten Staubkörnern nahezu alle kleinen kohlenstoffhaltigen Partikel und PAH-ähnliche Moleküle im interstellaren Staub erklären. Sobald Supernova-Explosionen die größeren Staubkörner zertrümmern, brechen die kleineren Partikel von dem organischen Mantel ab. Jedes ummantelte Staubkorn erzeugt dann einen Schwarm von Hunderttausenden winziger Staubteilchen.

Eismantel aus organischen Molekülen

Irgendwann einmal wird der gesamte Staub von dichten Molekülwolken eingefangen. Innerhalb dieser Wolken kollidieren die Staubkörner immer häufiger mit den Atomen und Molekülen des Gases. Nach etwa einer Million Jahren wächst auf den größeren Staubkörnern ein Eismantel heran, der hauptsächlich aus gefrorenem Wasser und Kohlenmonoxid besteht. Diese Verbindungen haben die Astronomen in dichten Staubwolken um Sterne nachgewiesen, zusammen mit kleineren Mengen von Kohlendioxid, Formaldehyd und Ammoniak. Auch wenn niemand direkt beobachtet hat, was mit den Kohlenstoffpartikeln und den PAH-ähnlichen Molekülen in den Molekülwolken geschieht, so ist es unvermeidlich, dass sich diese an den größeren Staubkörnern anlagern und im Eismantel aufgehen. Die organischen Moleküle werden dann durch die ultraviolette Strahlung weiterverwandelt, und der Zyklus beginnt aufs Neue.

Andere Forscher haben alternative Theorien vorgeschlagen, welche die Lichtdämpfung durch den interstellaren Staub ohne einen Mantel aus organischem Material auf den größeren Staubkörnern erklären. So postulierte etwa John S. Mathis von der Universität von Wisconsin-Madison, dass die größeren Staubkörner poröse Konglomerate kleinerer Graphit- und Silikatteilchen seien. Aber diese Modelle können eine andere Eigenschaft des interstellaren Staubes nicht befriedigend erklären: wie er das durchgehende Licht polarisiert, das heißt die elektromagnetischen Wellen in eine bestimmte Richtung ausrichtet. Dazu muss jedes der größeren Staubkörner wie ein Zylinder oder Sphäroid geformt sein und sich um seine kürzere Achse drehen wie ein rotierender Stab.

Um das Licht zu polarisieren, müssen die Rotationsachsen aller Staubkörner außerdem in dieselbe Richtung zeigen – ein Effekt, der Magnetfeldern in den Staubwolken zugeschrieben wird. Der Erfolg des vereinheitlichten Staubmodells ist, dass die hypothetischen um-

mantelten Staubkörner die beobachtete Polarisation bei allen Wellenlängen erklären können.

Kometen sind wahrscheinlich die ältesten Überbleibsel des solaren Urnebels – jener Wolke aus Gas und Staub, aus der unser Sonnensystem einst geboren wurde. Während Astronomen immer neue Erkenntnisse über die chemische Zusammensetzung von Kometen und interstellarem Staub gewinnen, verstärkt sich die Meinung, dass Kometen ursprünglich aus Anhäufungen von Staubkörnern entstanden sind. Wir können daher annehmen, durch die Beobachtung von Kometen auch mehr über den interstellaren Staub zu erfahren.

Als die Planeten und Kometen zusammen mit der Sonne vor 4,6 Milliarden Jahren entstanden, haben die ummantelten Staubkörner in der protosolaren Wolke höchstwahrscheinlich all die kleineren kohlenstoffhaltigen Partikel und die PAH-ähnlichen Moleküle absorbiert, ebenso alles Kohlenmonoxid und andere flüchtige Substanzen. Nur Wasserstoff und Helium blieben ungebunden zurück. Die Staubkörner stießen häufig genug zusammen, um große lose zusammenhängende Konglomerate entstehen zu lassen. Nach der vorherrschenden Theorie entwickelten sich diese lockeren Klumpen nun zu den Kernen der Kometen. Diese Kerne müssen sehr porös sein, also viele Hohlräume enthalten. Mein eigenes Modell für die Substanz der Kometenkerne enthält hundert mittelgroße protosolare Staubkörnchen, zusammengebacken zu einem drei Mikrometer großen Konglomerat. Diese Gebilde sind zu 80 Prozent des Volumens hohl.

Seit ihrer Entstehung umkreisen Kometen die Sonne in der Oortschen Wolke und dem Kuiper-Gürtel weit außerhalb der Planetenbahnen. Doch gelegentlich werfen Gravitationsstörungen die fernen Kometen auf Bahnen, die sie näher an die Sonne heranbringen. Neuerungen in unserem Verständnis von Kometen gab es 1986, als die Raumsonden Giotto sowie Wega 1 und 2 zum Halleyschen Kometen flogen, der sich der Sonne alle 76 Jahre nähert. Alle drei Raumsonden analysierten in Halleys Koma (der Gas- und Staubhülle um den festen Kometenkern) Masse und chemische Zusammensetzung aller Partikel. Die Staubteilchen trafen mit Geschwindigkeiten von rund 70 Kilometern pro Sekunde auf die Messgeräte und zerbrachen in ihre atomaren Komponenten. Die Instrumente registrierten dabei unterschiedlichste Teilchenmassen, von 10^{-14} Gramm, was man für einzelne Staubkörner mit Mantel erwartet, bis hin zu 10^{-18} Gramm, die typisch sind für kleinere kohlenstoffhaltige Partikel.

J. Mayo Greenberg *promovierte 1948 an der Johns Hopkins Universität in theoretischer Physik. 1975 ging er zur Universität von Leiden in den Niederlanden. Dort begründete und leitete er das Labor für Astrophysik, in dem er seitdem die chemische Evolution, die Zusammensetzung von Kometen und den Ursprung des Lebens erforscht.*

Dieses Kometenstaub-Modell des Autors zeigt eine lose, drei Mikrometer große Anhäufung von hundert ummantelten Staubkörnern. Da sie reich an organischen Verbindungen sind, könnten solche Klumpen Saatkeime des Lebens auf der Erde gewesen sein.



LOEK ZUIDERDUIN

Die Astrophysiker Jochen Kissel vom Max-Plank-Institut für Extraterrestrische Physik in Garching, Franz R. Krueger vom Ingenieurbüro Krueger in Darmstadt, sowie Elmar K. Jessberger von der Universität Münster bestimmten später, dass der Staub Halleys aus Konglomeraten von Teilchen mit silikatischem Kern und organischem Mantel bestanden – genau wie meine ursprüngliche Theorie für Kometen vorhersagte. Ihre Schlussfolgerungen beruhten auf dem Umstand, dass die Sauerstoff-, Kohlenstoff- und Stickstoffatome an den Detektoren der Raumsonden etwas früher ankamen als die Silizium-, Magnesium- und Eisenatome.

Der Staub als Zeuge für die Geburt der Galaxis

Wie alt ist Halleys Staub und der in den anderen Kometen? Wir wissen, dass der kosmische Staub zum Zeitpunkt der Entstehung der Kometen bereits etwa fünf Milliarden Jahre alt war. So lange verweilt nämlich ein Staubkorn im Mittel im interstellaren Raum, bevor es von einem neu entstehenden Stern verschlungen wird.
Und weil die Kometen der Sonne selbst 4,6 Milliarden Jahre alt sind, hat der Staub wahrscheinlich ein Alter von fast 10 Milliarden Jahren. Die Analyse des Kometenmaterial erlaubt uns somit, das Frühstadium unserer Galaxis zu erforschen.

Kometenstaub hat vielleicht auch eine Rolle dabei gespielt, Leben auf der Erde zu säen. Jedes lockere Klümpchen Kometenstaub enthält nicht nur organisches Material, sondern hat auch eine Struktur, die ideal für die chemische Evolution ist, wenn es einmal im Wasser eingetaucht ist. Kissel und Krueger haben gezeigt, dass kleine Moleküle sehr leicht von außen in den Klumpen eindringen können, aber größere Moleküle innendrin stecken bleiben. Solch eine Struktur kann die Produktion von immer größeren und komplexeren Molekülen anregen, und möglicherweise als winzige Brutstätte für die ersten primitiven Lebensformen dienen. Ein einzelner Komet könnte bis zu 10^{25} dieser „Saatkeime“ auf die junge Erde gebracht haben.

Die Nasa und die Europäische Weltraumagentur Esa unternehmen oder planen Missionen, die uns mehr über die Natur der Kometen und des interstellaren Staubes enthüllen werden. Die im Februar 1999 gestartete Nasa-Sonde Stardust soll im Jahr 2004 am Kometen Wild-2 vorbeifliegen und eine Staubprobe von der Kometenkoma zurückbringen. Auf dem Flug dorthin sammelt die Sonde auch Proben des interstellaren Staubes ein, wie er sich durch unser Sonnensystem bewegt.

Noch ehrgeiziger ist die geplante Rosetta-Mission der Esa. Ihr Start ist für das Jahr 2003 vorgesehen. Danach wird das Raumfahrzeug in eine Umlaufbahn um den Kern des Kometen Wirtanen einschwenken und eine Landesonde zur Oberfläche des Sonnentrabanten schicken.

Diese Weltraummissionen werden zweifellos neue Wege für die Forschung ebnen. Astronomen betrachten den Staub zwischen den Sternen nicht mehr als lästiges Hindernis. Längst ist er eine wichtige Informationsquelle über die Entstehung von Sternen, Planeten und Kometen. Und vielleicht enthält er sogar Hinweise auf den Ursprung des Lebens auf der Erde. ■

Molekulare Muskelmaschinen

Gewichte heben, Lasten halten und Bälle werfen – ohne unterschiedliche Fasertypen in unseren Muskeln wären die vielfältigen Anforderungen nicht zu bewältigen.

VON STEFAN GALLER

Drei Milliarden Herzschläge in einem Menschenleben, Höchstleistungen im Laufen, Gewichtheben und Springen, daneben die kontinuierliche Arbeit des Darmes und der Atmung: All das ist nur möglich, wenn Muskel nicht gleich Muskel ist. Und in der Tat: Schon ein kurzer Blick durchs Mikroskop genügt dem Fachmann, um das Muskelgewebe des Bewegungsapparates, der so genannten Skelettmuskeln, von dem der inneren Organe zu unterscheiden.

Das Instrument verrät jedoch nicht bis ins Letzte, woher die offensichtliche funktionelle Vielfalt der rund 400 Skelettmuskeln unseres Körpers rührt. Wie jedermann schon am eigenen Leib erfahren hat, arbeiten bestimmte Muskeln von vornherein schneller, präziser, ausdauernder oder kraftvoller als andere – wobei das eine aber das andere nicht völlig ausschließt. So sind für die Feinmotorik beim Klavierspiel die gleichen Muskeln zuständig wie für den festen Griff beim Tragen einer Einkaufstasche.

Die Ursachen für die funktionelle Vielfalt verbergen sich vor allem in feinen Nuancen der molekularen Bausteine: Von Muskelfaser zu Muskelfaser weichen viele der darin enthaltenen Proteine geringfügig, aber doch entscheidend voneinander ab. Der Fachmann spricht von Strukturvarianten oder Isoformen.

Einige wesentliche neue Erkenntnisse hierzu haben unsere Forschungen und die anderer Wissenschaftler in den letzten Jahren erbracht. Hand in Hand damit wurde die bewährte, aber vereinzelt noch bezweifelte Theorie zum molekularen Mechanismus der Kraftentwicklung auf eine noch solidere Grundlage gestellt. Lohn der Mühe unter anderem: die Entdeckung eines Fasertyps mit einer bislang unbekannten Variante des wichtigsten Muskelproteins. Es macht den Muskeln noch effizienter. Um zu verstehen, wie das geschieht, ist es zweckmäßig, sich die Funktionsprinzipien der Muskelkontraktion zu vergegenwärtigen.

Tausende von Muskelfasern bauen einen Skelettmuskel auf. Dies sind aber keine „Fäden“, sondern riesige Zellen, allerdings ausgesprochen schlauchförmige. Bei einer Dicke von etwa dreißig bis gut hundert Mikrometer (tausendstel Millimeter) werden sie immerhin mehrere Zentimeter lang. Als Besonderheit enthalten Muskelfasern neben zahlreichen Zellkernen vor allem „Myofibrillen“. Das sind verkürzungsfähige, etwa ein Mikrometer dicke Stränge, genauso lang wie die Fasern selbst. Dicht gebündelt, füllen sie einen beträchtlichen Teil des Zellinneren aus (Foto Seite 38).

Wer beispielsweise die Hand zur Faust ballt, hat Nervensignale vom Gehirn zu bestimmten Muskeln geschickt. Sie wirken wie ein zündender Funke: Ein Zisternensystem, das die Myofibrillen jeder Muskelfaser umspinnt, schüttet schlagartig Calcium-Ionen aus; die wiederum besetzen sogleich spezielle Empfängermoleküle, worauf die Myofibrillen ihre Kraftakte beginnen.

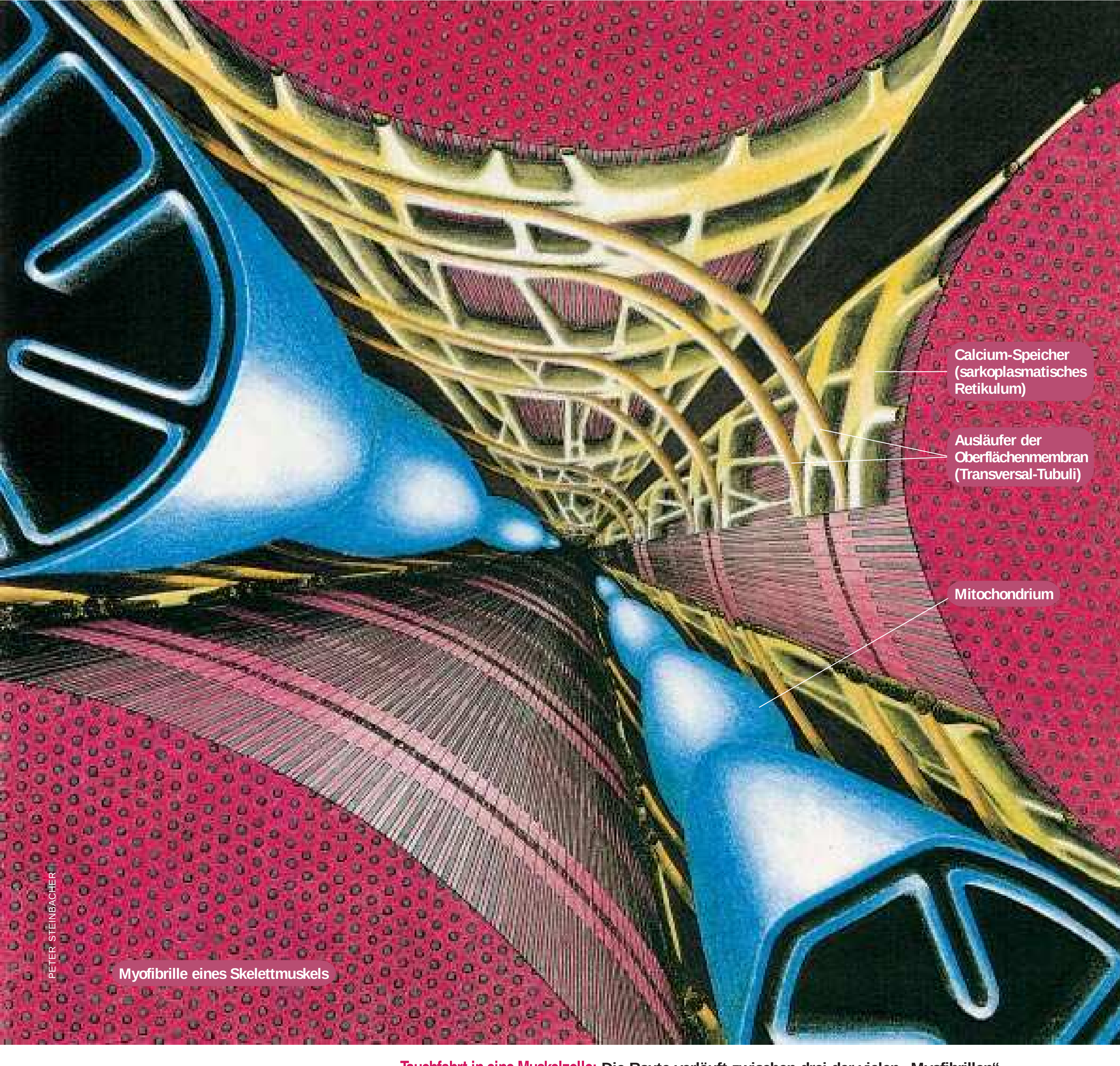
Tausende von Myofibrillen in einer Muskelfaser und wiederum Tausende von Fasern in einem Muskel werden über die Calcium-Konzentration präzise aktiviert und bei Bedarf wieder ruhig gestellt – Grundvoraussetzung für eine koordinierte Bewegung. Die parallele Anordnung der Myofibrillen wie auch der Fasern in Skelettmuskeln bündelt die winzigen Kräfte der einzelnen Komponenten zur geballten Kraft etwa einer Faust.

Das Motto „Viel Wenig gibt auch ein Viel“ setzt sich innerhalb der Myofibrillen fort. Wie die Muskelzelle selbst sehen auch sie wie prall gefüllte Schläuche aus, aber mit Querwänden in regelmäßigen Abständen. Diese abgeteilten kleinen Gefache – Fachleute sprechen von Sarkomeren – sind die „Kraftkammern“ der Muskeln. Von ihren beiden scheibenförmigen Abgrenzungen aus ragen dünne parallele Proteinfäden, die Aktinfilamente, zur Mitte der Kammer. In ihrer Anordnung erinnern sie ein wenig an die Borsten einer Bürste. An ihnen „klebt“ in regelmäßigen Abständen der erwähnte Calcium-Rezeptor. In der Mitte der Kammer erstrecken sich – wiederum parallel – dickere seilartige Proteinstränge: die

Skelettmuskeln als Herzmuskelersatz

Vor 15 Jahren berichteten die Pariser Herzchirurgen Alain Carpentier und Juan Carlos Chachques über eine neuartige Operation, mit der sie eine besondere Form schwerer Herzinsuffizienz lindern konnten. Sie hatten einen bestimmten Rückenmuskel von seinen Ansatzstellen gelöst und wie ein Korsett um die Herzkammern gelegt. Ein speziell entwickelter Stimulator registrierte den Herzschlag und regte den verpflanzten Muskel im gleichen Takt zur Kontraktion an.

Normalerweise kann ein Skelettmuskel nicht rund um die Uhr arbeiten; er braucht Erholungspausen. Ein Herzmuskel hingegen schlägt unermüdlich bis zum Lebensende. Das Entscheidende für den Erfolg der neuen Operation war daher das nachfolgende Spezialtraining des früheren Rückenmuskels. Sein Nerv wurde nach einem sorgfältig angelegten Plan gereizt, unterbrochen von immer kürzeren Ruhepausen, bis der Muskel nach einigen Wochen nicht mehr ermüdete. Danach unterstützte der Skelettmuskel den Herzschlag – ein eindrucksvolles Beispiel für die Anpassungsfähigkeit diese Gewebes. Seit der Pionierarbeit der beiden Pariser Herzchirurgen wurden inzwischen weltweit zahlreiche solcher Operationen erfolgreich durchgeführt.



Tauchfahrt in eine Muskelzelle: **Die Route verläuft zwischen drei der vielen „Myofibrillen“ (rot). Das sind kabelartige Stränge aus seriell geschalteten kontraktilen Elementen, umsponnen von einem Netzwerk aus Calcium-Speichern (gelbgrün). Zur Kontraktion angeregt werden sie, wenn ein Nervensignal über schlauchförmige Ausläufer (beige) der äußeren Zellmembran eintrifft und Calcium freisetzt. Energie für die Muskelarbeit liefern die hier blau gezeichneten Mitochondrien, die Kraftwerke der Zelle.**

„Myosinfilamente“. Sie ragen ein Stück weit zwischen die „Borsten“ und sehen ein wenig nach Stacheldraht aus. Ihnen entspringen nämlich in regelmäßigen Abständen kleine Stacheln, genauer: Greifarme in Form eines abgeknickten birnenförmigen Köpfchens. Jedes sitzt mit seinem Hals auf einem langen Schaft, der mit anderen den „Draht“ selbst bildet. In diesen Myosinköpfchen sehen die meisten Muskelforscher, auch wir, die eigentlichen bewegenden Elemente, die molekularen Motoren.

Da wir Forscher das molekulare Treiben in den Kraftkammern der Muskeln nicht direkt beobachten können, sind wir auf Schlussfolgerungen angewiesen, die sich aus indirekten Ansätzen ergeben. Wahrscheinlich aber interagieren die Myosinköpfchen fortwährend – auch wenn der Muskel ruht – mit den umliegenden „Aktin-Borsten“ ihrer Kammerhälfte, indem sie sich im raschen Takt mit einem „Kopfnicken“ anklinken und sofort wieder loslassen. Sobald auf ein Nervensignal hin aber Calcium die dünnen Fäden indirekt griffiger macht, können die Köpfchen fester und beständiger andocken, ehe sie wieder loslassen. So ziehen sie bei jedem „Nicken“ die ergriffenen Borsten um mehrere millionstel Millimeter in Richtung Kammermitte.

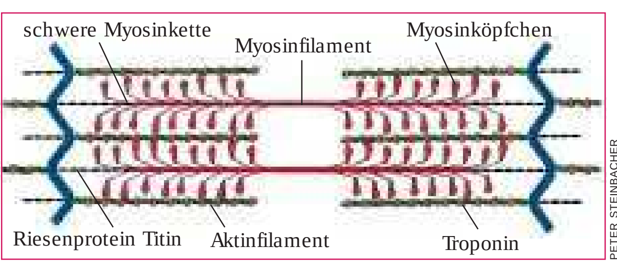
Offenbar beugt sich nicht der gesamte birnenförmige Greifarm, sondern nur sein sich verjüngender Halsteil. Darauf lassen ▶

Ergebnisse der letzten Jahre schließen. Wie auch immer: Da die Köpfchen jedes Mal weiter vorn zupacken, rücken die Bürstengriffe – sprich die Querwände – sukzessive aufeinander zu: Die Kraftkammer verkürzt sich teleskopartig um insgesamt mehrere zehntel Mikrometer. Wegen der riesigen Zahl aneinander gereihter Gefache in jeder Myofibrille summiert sich dies letztlich zu einer sichtbaren Verkürzung der Fasern und insgesamt des Muskels.

Aber nicht nur Bewegung, sondern auch zum Beispiel das bloße Halten einer Last kostet Energie. Man lese das Heft einmal mit horizontal vorgestreckten Armen weiter. Die Myosinköpfchen in den haltenden Muskeln setzen dann die ergriffenen dünnen Fäden bloß unter Spannung, ohne sie zu verschieben. Sie rudern sozusagen auf der Stelle, können nur immer wieder am selben Punkt zu ziehen versuchen.

Diese Rudertätigkeit erscheint hier auf den ersten Blick widersinnig; denn halten ließe sich eine Last auch, wenn die Myosinköpfchen einfach währenddessen stur an den dünnen Fäden angeklinkt blieben. Beispielsweise halten die Schließmuskeln von Muscheln auf diese Weise die Schalen ohne Energieaufwand geschlossen. Warum ist dieser ökonomische Mechanismus nicht auch in unseren Skelettmuskeln verwirklicht? Ganz einfach: Sie würden erstarren und sich nicht sogleich bei Bedarf weiter verkürzen können. Für den Schließmuskel der Muscheln ist das kein Problem; er kann sich ohnehin nicht weiter verkürzen, wenn die Schotten dicht sind. Wir hingegen wären sicherlich nicht erfreut, wenn unser horizontal ausgestreckter Arm in seiner Position erstarrte und sich erst nach Zeit raubenden Vorgängen wieder bewegen ließe.





Gebündelte Kraft: Geordnete Bündel von Proteinfäden füllen die Sarkomere, die einzelnen „Kraftkammern" der langen Myofibrillen. Die Trennwände erscheinen im Elektronenmikroskop als tiefdunkle, leicht gezackte Balken (oben). Die wichtigste Rolle beim Kraftakt der Muskeln spielen dünne Proteinfäden aus Aktin (blau) und dickere Seile aus Myosin (rot) mit abstehenden Köpfchen als Greifarme.

Genau wie die Myosinköpfchen anderer Säugetiere rudern auch unsere also fortwährend, sodass unsere Skelettmuskeln – außer in der Totenstarre – flexibel bleiben. Die Myosinköpfchen arbeiten allerdings nie im Gleichtakt. Würden sie das tun, käme es im regelmäßigen Rhythmus zu „haltlosen Zuständen". Da sie aber zeitlich unkoordiniert arbeiten, summiert sich das Ganze zu einer konstant anhaltenden Zugkraft, die es erlaubt, Lasten dauerhaft zu halten und gleichförmige Bewegungen auszuführen.

Wie schon angedeutet, unterscheiden sich die einzelnen Muskelzellen, die Muskelfasern, in ihren Eigenschaften. Je heterogener ein Muskel in dieser Hinsicht zusammengesetzt ist, desto breiter sind seine Einsatzmöglichkeiten.

Wie kommen nun Unterschiede im Verhalten einzelner Muskelfasern zu Stande? Eine Vielzahl von möglichen Einflussfaktoren kann variieren: sei es die Kontrolle durch die Nervenfasern, das Weiterleiten ihrer Befehle ins Zellinnere, die Energieversorgung oder das molekulare Geschehen in den Myofibrillen. Auf Letzteres werde ich mich hier beschränken.

Voraussetzung für Variationen in der Funktion sind immer Modifikationen in den beteiligten Strukturen. Die meisten Proteine der Myofibrillen treten in mindestens zwei Strukturvarianten auf. Mehrere solche „Isoformen" gibt es vor allem bei der so genannten schweren Myosinkette. Sie ist die Hauptkomponente jenes Proteins, das die Myosinfilamente aufbaut und in einem Greifarm endet.

Wenn nun Muskelfasern mit unterschiedlichen Varianten der schweren Myosinkette sich jeweils unterschiedlich schnell verkürzen, dann darf man mit einiger Gewissheit schließen, dass das Protein allgemein für den molekularen Mechanismus der Verkürzung verantwortlich ist. Je enger die festgestellte Korrelation, desto gesicherter die Schlussfolgerung.

Forscher haben bereits mehrfach untersucht, wie gut die maximale Kontraktionsgeschwindigkeit einzelner Muskelfasern mit den jeweils darin vorhandenen Varianten der schweren Myosinkette korreliert. Die ermittelten Bezüge waren aber nur teilweise überzeugend. Auch mein Labor hatte zunächst diesen Weg beschritten. Viel aufschlussreicher erwiesen sich dann unsere Studien, die statt der Verkürzungsgeschwindigkeit die so genannte Dehnungsaktivierung verglichen.

Die Dehnungsaktivierung ist ein verblüffendes, im Prinzip aber einfach messbares Phänomen. Man spannt eine hüllenlose Muskelfaser wie eine Wäscheleine zwischen zwei Pfosten und regt sie an, Zugkraft zu erzeugen (siehe Kasten auf Seite 40). Dann rückt man den einen „Pfosten" blitzschnell ein Stückchen weiter fort und verfolgt am anderen, wie sich die darauf ausgeübte Zugkraft ändert. Zunächst steigt der Wert abrupt, kehrt aber, wenn die neue Länge erreicht ist, zum Ausgangswert zurück. Doch noch während des Abfalls oder kurz danach, steigt er merkwürdigerweise nochmals vorübergehend an.

Für eben diesen unerwarteten Kraftanstieg, der verzögert nach einer Dehnung auftritt, hat sich der Name „Dehnungsaktivierung" eingebürgert. Worauf könnte er beruhen? Werfen wir einen Blick in die molekularen Kraftkammern und überlegen uns, was geschieht, wenn eine Muskelfaser plötzlich etwas gestreckt wird. In jeder Kraftkammer ihrer zahlreichen Myofibrillen zieht man dadurch die dünnen Molekülfäden – die Borsten – etwas weiter aus dem Bereich der dicken Stränge heraus. Da deren

Literaturhinweise

Alter Muskel rostet nicht. Von Dirk Pette. In: Konstanzer Universitätsreden, Universitätsverlag Konstanz, 1998.

Skelettmuskel als Herzersatz. Von Dirk Pette. In: Konstanzer Universitätsreden, Universitätsverlag Konstanz, 1990.

Two functionally distinct myosin heavy chain isoforms in slow skeletal muscle fibres. Von S. Galler et al. in: FEBS Letters, Bd. 410, S. 150, 1997.

Weitere Hinweise finden Sie unter ***www.spektrum.de/aktuelles heft.html***

Greifarme alle asynchron rudern, halten in jedem Augenblick stets viele „Hände“ die Borsten fest. Das ruckartige Wegziehen ihres Halts dehnt sie jäh. Den Widerstand, den sie dabei leisten, messen wir als ersten, abrupten Kraftanstieg.

Etliche Greifarme werden wahrscheinlich so sehr gedehnt, dass sie sich eher als vorgesehen lösen. Dies äußert sich in dem markanten Kraftabfall nach dem Ruck. Nach kurzer Zeit heften sich die losgelösten Arme wieder an und üben nun vorübergehend ziemlich taktgleich Zugkräfte aus. Die Dehnungsaktivierung repräsentiert somit vermutlich einen gemeinsamen molekularen Kraftakt von Greifarmen, die infolge der abrupten Dehnung vorübergehend zeitlich synchronisiert wurden.

Fasern auf der Streckbank

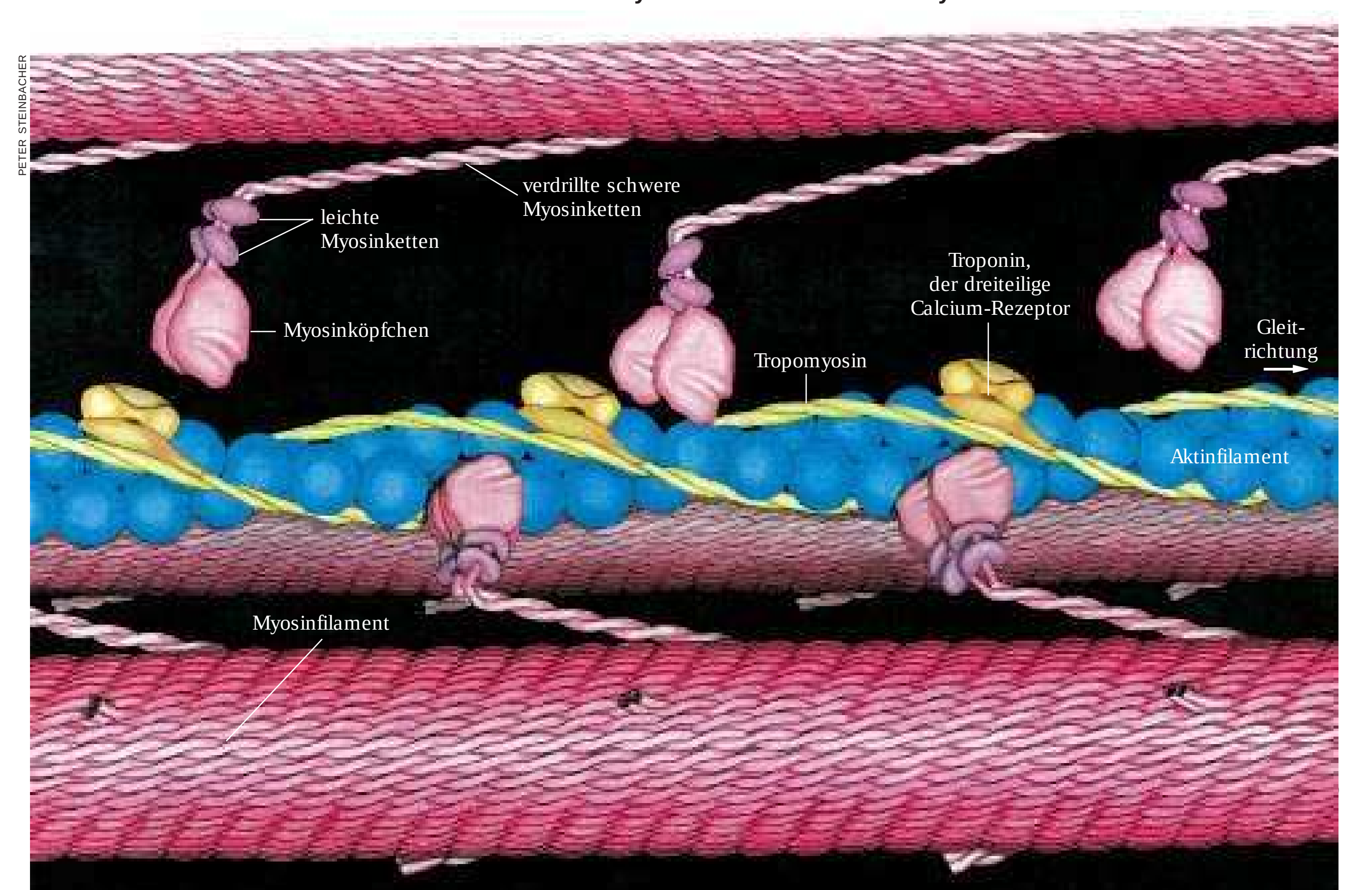
Das alles klingt plausibel, ist aber reine Theorie. Was in den Kraftkammern tatsächlich im Detail passiert, entzieht sich unserer Kenntnis. Doch alle Forscher – auch die wenigen, die das Konzept der Myosinköpfchen als Verursacher der Muskelkraft ablehnen – dürften sich in einem Punkt einig sein: Der unerwartete Kraftanstieg bei der Dehnungsaktivierung kann nur durch molekulare Motoren bewirkt sein, wer immer diese auch sein mögen. Fände sich nun ein klarer Zusammenhang zwischen dem jeweiligen Verlauf der Dehnungsaktivierung und den Varianten der Greifarme, dann könnte sich die Fachwelt sehr viel sicherer sein, dass diese tatsächlich die krafterzeugenden Elemente darstellen.

Zusammen mit meinem Mitarbeiter Karlheinz Hilber prüfte ich deshalb in meinem Labor an der Universität Salzburg einige hundert „enthäutete“ Fasern aus Beinmuskeln von Ratten und Kaninchen auf ihr Verhalten. Das geschah in einer eigens entwickelten Apparatur, um exakte Messungen unter konstanten Bedingungen zu ermöglichen (siehe Abbildung im Kasten auf Seite 40). Die anschließende diffizile Proteinanalyse übernahm das biochemische Labor von Dirk Pette an der Universität Konstanz. Bestimmt wurden vor allem die Strukturvarianten der schweren Myosinkette. Aus den Muskeln der Gliedmaßen erwachsener Säugetiere waren bis dahin vier solcher Varianten bekannt: 1, 2a, 2b und 2d. Muskelfasern, die ausschließlich eine dieser Sorten enthalten, tragen analog die Bezeichnung Typ 1, Typ 2A, Typ 2B und Typ 2D. Neben diesen „reinrassigen“ Fasertypen gibt es auch Mischfasern mit zwei Varianten.

Analysiert wurden die Proteine mit Hilfe der Gel-Elektrophorese. Dabei wandern die Eiweißstoffe, angetrieben von einem elektrischen Feld, durch das molekulare Maschennetz eines Polyacrylamid-Gels und trennen sich entsprechend ihrer Größe und Ladung. Das Ergebnis ist schließlich ein Muster von Streifen, von denen jeder ein Protein repräsentiert.

Als wir die gewonnenen biochemischen Daten mit den physiologischen Eigenschaften der Muskelfasern verglichen, zeigte sich ein verblüffend enger Zusammenhang zwischen der Zeit bis zur maximalen Dehnungsaktivierung und der Art der schweren Myosinkette (Diagramm auf Seite 41): Am schnellsten reagierten Fasern vom Typ 2B, gefolgt von Typ 2D und dann Typ 2A. Weit abgeschlagen rangierte Typ 1; diese Fasern waren im Mittel etwa 30-mal langsamer als die schnellsten. Die jeweiligen Mischfasern lagen mit ihren Werten zwischen den reinen Fasertypen, ohne sich damit zu überschneiden. Selbst das genaue Mischungsverhältnis ihrer beiden Ketten-Varianten wirkte sich aus: Ein höherer Anteil der Variante 2d beispielsweise verlangsamte die Reaktion stärker als ein geringer Anteil. Wir durften daher berechtigt annehmen, dass die Geschwindigkeit der Dehnungsaktivierung im Wesentlichen ▶

Der molekulare Kraftakt: Mit einer rudernden Bewegung heften sich die Myosinköpfchen (rot) an einen Aktinfaden (blau) und üben eine Zugkraft aus. Dabei knickt nach neueren Erkenntnissen wahrscheinlich nicht das gesamte birnenförmige Köpfchen ab, sondern nur sein sich verjüngender Halsteil, den ein Kragen aus leichten Myosinketten (violett) umschließt. Unter den Proteinkomponenten der Myofibrillen weist die schwere Myosinkette besonders viele Varianten auf.



durch die Varianten der schweren Myosinkette bestimmt wird.

Natürlich haben wir mit Pettes Labor auch noch die Strukturvarianten anderer Proteine der Kraftkammern analysiert. Doch nie ergab sich ein entsprechender Zusammenhang bei den getesteten Fasern.

Alles in allem scheint nun jener Baustein im Puzzle der Muskelforschung gefunden, der eine ursächliche Verknüpfung zwischen Greifarmvarianten und Dehnungsaktivierung herstellt. Die vereinzelt immer noch bezweifelte Theorie, dass die Muskelkraft letztlich auf der „Handarbeit" der dicken Molekülfäden in den Kraftkammern beruht, steht damit auf einer solideren Grundlage.

Rudern im Schneckentempo

Unser Befund untermauerte zugleich die Annahme, die Dehnungsaktivierung selbst rühre von einem gemeinsamen molekularen Kraftakt zeitlich synchronisierter Greifarme her. Somit konnten wir auch deren relatives Rudertempo ableiten. Im Vergleich zur Kettenvariante 2b rudern Greifarme der Variante 1 etwa 30-mal langsamer; 2a ist etwa sechsmal und 2d etwa zweimal langsamer. Diese Unterschiede im Rudertakt sind höchstwahrscheinlich eine der wichtigsten Ursachen für die Vielfalt der funktionellen Leistungen von Skelettmuskeln. Je langsamer der Takt, desto sparsamer der Energieverbrauch bei bloßer Haltearbeit. Das macht solche Fasern ausdauernder.

Erweitert werden diese Möglichkeiten noch durch die überraschende Entdeckung einer bis dahin unbekannten Variante der schweren Myosinkette. Darauf gestoßen sind wir, als wir aus bestimmten Muskeln am Hinterlauf eines Kaninchens vermeintlich reine Typ 1-Fasern untersuchten. „Enthäutet" arbeiteten diese Zellen vereinzelt bis zu 100-mal langsamer als die schnellsten. Bei der Gel-Elektrophorese erschien unterhalb des üblichen Proteinstreifens gewöhnlicher Typ-1-Fasern noch ein weiterer: Je mächtiger dieser ausgeprägt war, desto langsamer die Dehnungsaktivierung der Muskelfasern. Der zusätzliche Proteinstreifen musste eine neue Strukturvariante der schweren Myosinkette im Skelettmuskel repräsentieren – eine mit einem viel langsamer rudernden Greifarm.

Wir gaben ihr das Kürzel „1a" und tauften zugleich die alte in „1β" um, weil sie offenbar der Beta-Variante des Herzmuskels entspricht. Das Herz enthält im Übrigen noch eine als Alpha-Variante bezeichnete Sorte. Diese tritt vor allem in der Muskulatur der Vorhöfe auf und

Muskelfasern auf der Folterbank

Für bestimmte Messungen ist es zweckmäßig, eine einzelne Muskelzelle – eine Muskelfaser – von ihren Membranen zu befreien und in einer künstlichen Lösung zu untersuchen. Das Ergebnis ist eine so genannte „enthäutete" Muskelfaser – im Wesentlichen nur noch ein Bündel von voll funktionstüchtigen Myofibrillen.

Das künstliche Badewasser ist dem inneren Milieu der Muskelzellen nachempfunden; vor allem stellt es den Energieträger ATP bereit. Die Enden der Faser befestigen wir an den Spitzen zweier aufrechter Nadeln. Eine davon dient als Messfühler für die Zugkraft der Muskelfaser. An der anderen sitzt ein Schrittmotor, der die Länge der Muskelfasern schnell und präzise ändern kann. Erhöhen wir in der Lösung die Konzentration des Botenstoffes Calcium auf geeignete Werte, dann versucht die enthäutete Faser, sich zusammenzuziehen. Da die Nadeln starr sind, kann sie sich nur anspannen, aber nicht verkürzen. In diesem Zustand strecken wir die Muskelfaser durch eine blitzschnelle Bewegung des Schrittmotors um wenige Promille ihrer Ausgangslänge und halten sie in ihrer neuen Lage fest.

Was nimmt der Kraftfühler am anderen Ende der Faser wahr? Während der schnellen Dehnung steigt die Zugkraft abrupt an und kehrt nach Erreichen der neuen Faserlänge wieder zum Ausgangswert zurück. Doch noch während dieses Kraftabfalls oder kurz danach steigt die Zugkraft von selbst erneut an, ehe sie endgültig langsam verebbt. Für diesen unerwarteten spontanen Kraftanstieg, der einer Dehnung verzögert nachfolgt, hat sich der Name „Dehnungsaktivierung" eingebürgert.

Bei unserer Untersuchung an hunderten enthäuteten Muskelzellen zeigte jeder Fasertyp ein etwas anderes Verhalten bei der Dehnungsaktivierung, und zwar in enger Korrelation mit den jeweils enthaltenen bekannten Varianten der so genannten schweren Kette des Myosinproteins. Das abweichende Verhalten einiger Zellen führte uns schließlich auf die Spur einer bis dahin unbekannten Variante.

Helium-Neon-Laser
Mikrometerschraube
Schrittmotor
Kraftsensor misst Zugkraft
gehäutete Muskelfaser
Transport-vorrichtung
Glasbehälter mit unterschiedlichen Lösungen
gebeugtes Laserlicht
Sensor erfasst Verschiebungen der Proteinfäden

PETER STEINBACHER / STEFAN GALLER



STEFAN GALLER

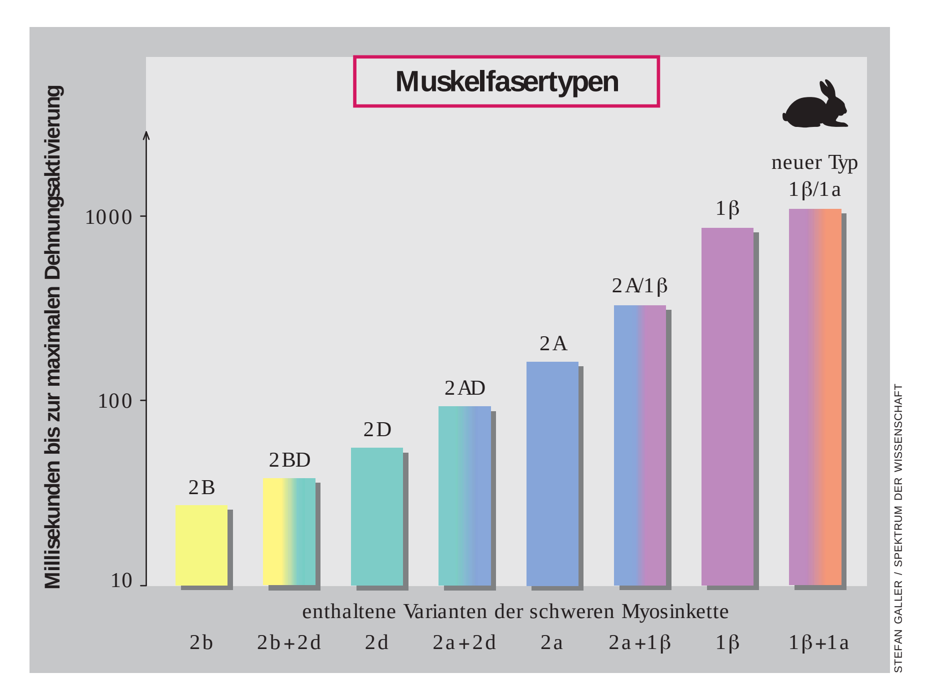
Eine „enthäutete" Muskelfaser aus einem Beinmuskel des Autors (rechts). Für mechanische Messungen wurde sie an die Nadeln der Versuchsapparatur geklebt. Der Schrittmotor zieht die angespannte Muskelfaser mit einem kurzen Ruck in die Länge. Der Kraftsensor registriert dies und die nachfolgende „Dehnungsaktivierung". Die Zeitspanne bis zu deren Maximum hängt vom Muskelfasertyp ab – und der wiederum von den jeweils vorhandenen schweren Myosinketten.

rudert – unseren Experimenten der Dehnungsaktivierung zufolge – etwa dreimal schneller als die Beta-Variante. Die neue Form im Skelettmuskel war also etwas anderes; deswegen bekam sie von uns nicht den Zusatz „Alpha", sondern „a"

Doch zurück zum Kaninchenlauf. In seinen Skelettmuskeln gibt es also neben den bekannten reinen Typ-1β-Fasern auch Mischfasern, die noch langsamer sind: durch eine Beimischung der Variante 1a. Einen reinen Typ 1a haben wir allerdings bisher noch nicht entdeckt.

Doch wie steht es mit menschlichen Skelettmuskeln? Auch hier umfassen die langsamen Zuckungsfasern höchstwahrscheinlich mehr als einen Typ. Dies lassen zumindest die Ergebnisse unserer jüngsten Studien an zahlreichen solchen Fasern vermuten. Die Geschwindigkeitswerte ihrer Dehnungsaktivierung zeigen nämlich eine Häufigkeitsverteilung, die mehr als eine Sorte langsamer schwerer Ketten nahe legt. Gegenwärtig versuchen wir, die vermuteten molekularen Varianten mittels biochemischer Analysen aufzutrennen. Da diese Proteine sehr groß und in ihrem Aufbau wahrscheinlich nur minimal verschieden sind, gestaltet sich das allerdings äußerst schwierig.

In den Skelettmuskeln unserer Gliedmaßen kommen langsame Zuckungsfasern insgesamt viel häufiger vor als bei Maus, Ratte und Kaninchen. Daher erwarten wir auch eine differenziertere Aufgabenteilung: Halteleistungen und langsame Bewegungen würden sich auf jeweils eigene langsame Fasertypen verteilen. Dies erscheint umso zweckmäßiger, wenn man bedenkt, dass die schnellen Zuckungsfasern beim Menschen und bei einigen anderen großen Säugetieren wie Pferden und Rindern nur zwei Typen umfassen: 2A und 2X. Unsere Untersuchungen legen nahe, dass diese beiden jeweils den Typen 2A und 2D von Kaninchen und Ratte entsprechen. Lediglich kleinere Säugetiere scheinen daneben noch den dritten flotteren Fasertyp, nämlich 2B, zu besitzen. Warum gerade sie den schnellsten aller Typen brauchen und warum ihre



Schwere Myosinketten: Ihre Varianten in Skelettmuskeln erwachsener Säugetiere bestimmen den Muskelfasertyp. Dieser korreliert eng mit der Zeit bis zur maximalen Dehnungsaktivierung, wie die Experimente zeigten. Muskelfasern mit zwei verschiedenen Varianten der Kette fügen sich zeitlich exakt zwischen die jeweiligen reinen Fasertypen. Ein neu entdeckter Fasertyp mit einer bis dahin unbekannten Variante der schweren Kette – 1a getauft – arbeitet besonders langsam, was ihn ausdauernder macht. Nicht bei jeder Säugerart kommt aber das gesamte Spektrum vor.

Beinmuskulatur insgesamt einen hohen Anteil an diversen Sorten schneller Zuckungsfasern aufweist, erklärt sich von selbst, wenn man gedanklich Mensch und Maus zum Wettlauf antreten lässt: Für einen einzigen raumgreifenden Schritt eines Läufers muss eine Maus eben unzählige Male ihre Beinchen flitzen lassen.

Die Entdeckung einer neuen Variante der schweren Myosinkette zeigt, dass Differenzierung und Spezialisierung in Skelettmuskeln viel ausgeprägter sind als bisher angenommen. Arbeitsteilung spielt eben offensichtlich auch bei den Leistungen langsamer Zuckungsmuskeln eine wesentliche Rolle; sie ermöglicht es, Tätigkeiten ökonomischer zu bewältigen.

Mehr über den molekularen Feinbau der Muskeln und die Möglichkeiten seiner Umgestaltung zu wissen, ist vor allem für die angewandten Wissenschaften der Bewegungs- und Sportphysiologie, aber auch für die Humanmedizin bedeutsam. In Skelettmuskeln bleibt die Zusammensetzung der Fasertypen nicht konstant, sondern stellt sich innerhalb weniger Wochen auf den jeweiligen Bedarf ein. Für diese Umwandlung ist das elektrische Muster der einlaufenden Nervenimpulse entscheidend. Dies weiß man aus Experimenten mit eingepflanzten Elektroden, mit denen Forscher einzelne Muskeln im lebenden Tier über die zuführenden Nerven gereizt haben. Anhaltende Reizung mit nur geringer Impuls-Frequenz – das entspricht einem Ausdauertraining – führt zu einer Umwandlung von schnellen in langsame Fasern. Kurze intensive Reizung mit langen Ruhepausen hingegen – das entspricht einem Sprinttraining – bewirkt das Umgekehrte, allerdings nur innerhalb gewisser Grenzen.

Sich umwandelnde Muskelzellen tauschen die Varianten ihrer schweren Myosinkette aus, zusätzlich aber noch viele andere Proteine, darunter Enzyme, welche die Zellen mit der universellen biochemischen Energiewährung ATP versorgen. Anders gesagt: Die Muskelzellen lesen andere Proteingene ab als zuvor. Hat sich nach effektivem Ausdauertraining der Energiestoffwechsel weitgehend bis vollständig auf die ergiebigste Form der ATP-Produktion umgestellt, ermüden die Muskeln kaum noch. Dies geht so weit, dass umtrainierte verpflanzte Rückenmuskeln einen geschwächten Herzmuskel zumindest entlasten können (siehe Kasten auf Seite 36).

Die Wandlungsfähigkeit der Muskeln bleibt übrigens auch im Alter erhalten. Das haben Experimente mit implantierten Reizelektroden zumindest an alten Ratten gezeigt. „Alter Muskel rostet nicht" mag also der Slogan lauten. ■


GUSTAV GÜRSCHNER

***Stefan Galler** forscht und lehrt er an der Universität Salzburg. Seine Forschungsschwerpunkte sind der Ionenhaushalt von Zellen und die Muskelkontraktion. Kurzfristig war er auch an Untersuchungen der Gletschermumie „Ötzi" beteiligt.*

Wer waren die



ZEICHNUNGEN: PAMELA PATRICK; FOTO: MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG VON TOM DILLEHAY

VON SASHA NEMECEK

Südchile, vor 14 700 Jahren: Eine Gruppe von ungefähr dreißig Männern, Frauen und Kindern siedelt für kurze Zeit an einem kleinen Bach. Diese Menschen werden dort bleiben, solange es genug Nahrung gibt – Wurzeln, Früchte und Wild. Wenn sie weiterziehen, lässt einer der Jäger eine blattförmige Speerspitze zurück, die Archäologen unserer Zeit entdecken werden. „Monte Verde" nennen sie diesen bislang ältesten Siedlungsplatz in Südamerika. Waren jene Pioniere wohlmöglich Nachkommen von Menschen, die vor mindestens 15 000 Jahren über eine Landbrücke von Asien nach Nordamerika gelangten?

Kentucky in den USA, ein Kellerraum der Universität: Der Anthropologe Tom Dillehay, der Monte Verde in den siebziger Jahren freigelegt hat, breitet vor mir eine kleine Sammlung von Artefakten aus, darunter die erwähnte, eigentlich recht zierlich wirkende Speerspitze. Dillehay macht mich auf das Fragment einer anderen aufmerksam, die ihr sehr ähnelt. „Vielleicht wurden sie von derselben Person angefertigt", vermutet der Wissenschaftler.

Stunden, vielleicht sogar Tage, brauchte jener Mensch, um so ein Steinwerkzeug zu fertigen. Jede Speerspitze misst knapp 10 Zentimeter und ist 12 Millimeter stark. Selbst meinem ungeschulten Auge fällt die exzellente Verarbeitung auf: Völlig symmetrisch verläuft eine Reihe winziger Kerben und formt die scharfe Klinge.

Wann die ersten Menschen nach Amerika kamen, wird unter Anthropologen und Archäologen in den letzten Jahren lebhaft diskutiert. Die Datierung von Monte Verde widerspricht der bislang gängigen Annahme – vor etwa 14 000 Jahren – und fand denn auch erst 1997 internationale Anerkennung. Doch einige wenige zweifeln nach wie vor. Sie werden es künftig nicht leicht haben: Aktuelle Ausgrabungen in Südamerika und im Osten der USA deuten darauf hin, dass die ersten Menschen sogar vor 20 000 oder gar 40 000 Jahren auf dem Kontinent eintrafen (siehe Karte Seite 44/45). Aus ihren Hinterlassenschaften rekonstruieren Forscher, wie diese frühen Amerikaner jagten und welche Pflanzen sie aßen.

Die herkömmliche Datierung lässt sich bis in das Jahr 1589 zurückverfol-

ersten Amerikaner?

Es galt als sicher: Jäger folgten Mammutherden vor 13 000 Jahren von Sibirien über die Beringstraße nach Amerika. Neuere archäologische Funde widersprechen diesem Standardmodell. Danach ist es nur eine These von mehreren. Jagten die Uramerikaner Fische statt Mammuts?

gen, als der in Südamerika wirkende Jesuitenmissionar José de Acosta postulierte, die Ur-Amerikaner müssten vor vielen tausend Jahren irgendwie von Sibirien nach Amerika gekommen sein. Diese These hatte Bestand, und zu Anfang des 20. Jahrhunderts war sich die Fachwelt weitgehend darüber einig.

In Clovis (Neumexiko) untersuchte Ridgely Whiteman vom Smithsonian Institut in Washington (D. C.) 1929 einen alten Siedlungsplatz und fand Speerspitzen mit zwei scharfen Kanten und Kerben oder Nuten an den Enden. Ihr Alter datierte man anhand von organischen Resten in den Fundschichten auf rund 13000 Jahre. Seitdem gruben Archäologen derartige Waffen in Kanada, den gesamten USA und in Mittelamerika aus. In manchen Teilen der Vereinigten Staaten, insbesondere in den Wüsten des Südwestens, sind sie fast so häufig wie Kakteen. Die Ähnlichkeit dieser Werkzeuge aus den verschiedenen Fundstellen ist so groß, dass ein gemeinsamer Kulturkreis nahe liegt; nach dem ersten Fundort nennt man ihn Clovis. Unter dieser Annahme erschien es nur vernünftig, auch von einer einzigen Besiedlungswelle kurz vor dieser Zeit auszugehen.

Mit ihren Speeren, so die bis vor etwa zehn Jahren gängige Theorie, jagten diese Vorfahren der Indianer Großwild wie das Wollmammut oder das Bison. Deren Fleisch lieferte reichlich Fett und Proteine, die wolligen Felle warme Kleidung. Im Gefolge der wandernden Herden könnten die Pioniere vor etwa 15000 bis 14000 Jahren über die damals trockenliegende Beringstraße Amerika betreten haben. Zu dieser Zeit waren die eiszeitlichen Gletscher gerade so weit zurückgewichen, dass sie einen Landweg durch Kanada freigaben. Innerhalb von etwa eintausend Jahren bahnte sich der Mensch seinen Weg durch ganz Nord- und Südamerika, von der Suche nach Nahrung vorangetrieben. ▶



Mammutjäger oder Fischer? Lange Zeit glaubten Archäologen, die ersten Bewohner der Neuen Welt seien mit Fellen bekleidete Großwildjäger gewesen, die ihren Beutetieren über die Bering-Landbrücke folgten. Neue Funde deuten jedoch darauf hin, dass die Ur-Amerikaner auf ihrer Wanderung durch eher gemäßigte Zonen ebenso gut von Kleinwild, Fisch und pflanzlicher Nahrung gelebt haben könnten. Das Foto (links) zeigt eines der ältesten menschlichen Artefakte des amerikanischen Kontinents – eine kleine Speerspitze von einem 14700 Jahre alten Siedlungsplatz in Chile.

Diese Vorstellung von den mutigen Großwildjägern füllt seit Jahrzehnten Lehrbücher und wissenschaftliche Zeitschriften. Doch sie hat ihre blinden Flecken, wie mehr und mehr Wissenschaftler bemängeln. Dazu gehört David Meltzer, Anthropologe an der Southern Methodist University in Dallas (Texas). Allzu simpel scheint ihm das Klischee von den Mammutknochen kauenden Ur-Indianern: „Für kleine Gruppen von etwa 15 bis 30 Personen, eine für Nomadenvölker typische Größe, wäre die Mammutjagd als einzige Nahrungsquelle viel zu riskant gewesen. Kleinwild, Nüsse und Beeren, vielleicht auch Fisch und Schildkröten gehörten sicher auch auf den Speiseplan.“ Archäologen haben in Clovis-Ausgrabungsstätten tatsächlich Überreste von Rotwild, Kaninchen und Schlangen entdeckt. Doch leider bleiben die bei der Kleinwildjagd, dem Fischfang und dem Sammeln pflanzlicher Nahrung verwendeten hölzernen Werkzeuge, Netze und Körbe in aller Regel nicht so gut erhalten wie aus Stein gefertigte Artefakte.

13000 Jahre alte Körbe

Eine Ausnahme macht die Ausgrabungsstätte „Meadowcroft Rockshelter“ südwestlich von Pittsburgh. Der Archäologe James Adovasio vom Mercyhurst College in Erie (Pennsylvania) fand dort in fast dreißig Jahren zahlreiche vergängliche Artefakte: Körbe, die einst vielleicht zum Transport pflanzlicher Nahrung genutzt worden sind, Teile von Fallen für Kleinwild und sogar knöcherne Ahlen zur Bearbeitung von Textilien und Leder. Das Alter dieser Funde schätzt der Wissenschaftler auf mindestens 12900 Jahre.

Doch von Anfang an kritisierten Fachkollegen seine Interpretation dieser Funde und zweifelten überdies am Alter der Ausgrabungsstätte. Einige vermuteten eine Kontamination der Erdschichten mit älterem Material, das dann zur Datierung genutzt worden sei. Dieser Vorwurf wurde 1999 von Paul Goldberg von der Universität Boston (Massachusetts) entkräftet.

Adovasio ärgert sich über die Art der Diskussion um seine Ausgrabungen: „Wir finden Nadeln aus Tierknochen, und die Leute sagen sofort: Na klar, damit wurde Leder genäht. Dabei sind diese Nadeln viel zu ▶

Fundstätten aus alter Zeit

1. Modell:

Zugang über Land
Während der letzten Eiszeit, als der Meeresspiegel viel niedriger lag als heute, war die nach dem dänischen Entdecker Vitus Bering benannte Meerenge zwischen Sibirien und Nordamerika noch trockenes Land. Der herkömmlichen Theorie zufolge zogen die ersten Einwanderer von Nordostasien nach Alaska und gelangten dann durch einen eisfreien Korridor zwischen zwei Gletscherzonen in das Gebiet der heutigen USA. Sie wanderten zu Fuß bis nach Mittel- und Südamerika.

2. Modell:

Fahrt entlang der Küsten
Alternativ dazu ziehen viele Forscher inzwischen die Möglichkeit in Betracht, Migranten aus dem südostasiatischen Raum könnten in kleinen Booten der Küstenlinie gefolgt sein. In dem Fall hätten sie Feuerland in nur hundert Jahren erreichen können.

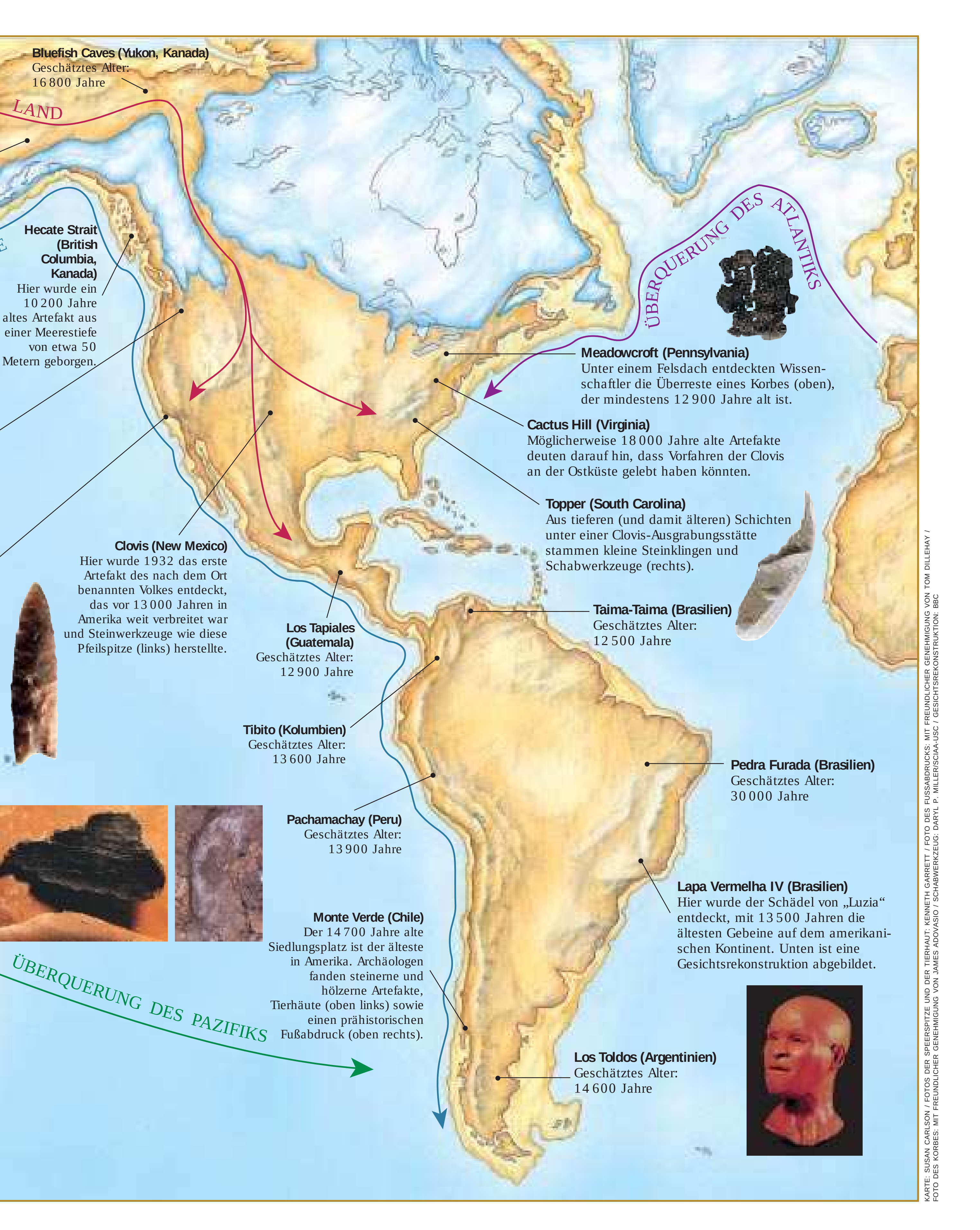
3. Modell:

Überquerung des Pazifiks
Einwohner Australiens und der Südpazifischen Inseln könnten ostwärts bis nach Südamerika gefahren sein. Für dieses Szenario gibt es zwar kaum Beweise, doch einige Anthropologen sehen Ähnlichkeiten zwischen den Schädelformen der Ur-Amerikaner und den Vorfahren der Polynesier und japanischen Ainu.

4. Modell:

Überquerung des Atlantiks
Bewohner der Iberischen Halbinsel könnten in Schiffen der Eiskante jener Gletscher gefolgt sein, die damals die Nordsee bedeckten. Diese Theorie bleibt vage, sie stützt sich auf beobachtete Ähnlichkeiten zwischen den Clovis-Speerspitzen und Techniken des europäischen Solutréen, einer Kulturstufe der jüngeren Altsteinzeit vor 16000 bis vor 24000 Jahren.





KARTE: SUSAN CARLSON / FOTOS DER SPEERSPITZE UND DER TIERHAUT: KENNETH GARRETT / FOTO DES FUSSABDRUCKS: MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG VON TOM DILLEHAY / FOTO DES KORBES: MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG VON JAMES ADOVASIO / SCHABWERKZEUG: DARYL P. MILLER/SCIAA-USC / GESICHTSREKONSTRUKTION: BBC

zerbrechlich, das sieht man doch.“ Die Knochennadeln müssten deshalb zum Nähen leichter Gewebe aus pflanzlichen Fasern gedient haben. Wozu diese benötigt wurden? „Viele machen den Fehler, dass sie denken, in der Eiszeit sei es immer kalt gewesen. Sie stellen sich vierzigtausendmal Januar vor, und vergessen ganz, dass es auch vierzigtausendmal Juli wurde“, meint der Archäologe augenzwinkernd.

Waren die Clovis tatsächlich die Pioniere in Amerika? Oder hatten sie auf dem Doppelkontinent Vorgänger?

Und noch eine Schwäche des offiziellen, Mammutjäger-zentrierten Bildes vom Ur-Amerikaner: Es ignoriert Frauen, Kinder und ältere Menschen. Wer aber nähte wohl die Kleidung für die wärmeren Monate? Adovasio relativiert deshalb die Bedeutung der Speerspitzen: „Wenn wir uns nur mit Steinen befassen, entgehen uns 95 Prozent vom Leben dieser Menschen. Bei Jäger- und Sammlervölkern unserer Zeit beschaffen Frauen, Kinder und ältere Menschen den allergrößten Teil der Nahrung und fertigen Kleidung, Netze und Körbe. Warum sollte das bei den frühen Amerikanern anders gewesen sein?“

Noch ein blinder Fleck der Standardtheorie ist die Frage nach der Fortbewegungsweise der Clovis-Menschen. Margaret Jodry, Archäologin am Smithsonian Institut in Washington (D. C.) zweifelt am gängigen Bild einer „Völkerwanderung“. Denn manche Fundstätten liegen beiderseits eines Flusses. „Wenn wir nicht annehmen wollen, dass die Leute jeden Tag hindurch geschwommen sind, mitsamt den Alten, Schwangeren, Kindern und Haustieren, müssen sie wohl Boote gehabt haben. Unwahrscheinlich ist das nicht, denn Wasserfahrzeuge gibt es auf der Welt seit mindestens 40 000 Jahren – damals besiedelte der Mensch Australien.“ Zudem belegen Menschenknochen auf den Channel Islands vor der kalifornischen Küste, die nur etwas jünger sind als die ältesten Werkzeuge der Clovis, dass die ersten Amerikaner das Meer zu befahren wussten.

Clovis-Boote hätten wohl aus Tierhäuten oder Holz bestanden, also ebenfalls aus schnell vergänglichen Materialien, die sich nur selten erhalten haben dürften. Doch Jodry beobachtete nordamerikanische Indianer beim Bau von Fahrzeugen und identifizierte anhand ihrer Konstruktionstechniken mögliche archäologische „Marker“: Beispielsweise könnte eine bestimmte Konfiguration von mit Steinen eingefassten Pfostenlöchern den Standort einer alten „Bootswerkstatt“ anzeigen.

Als Reaktion auf diese neuen Fragestellungen und Hypothesen gehen Archäologen bei der Auswahl ihrer Grabungsorte und -methoden heute anders vor als noch vor ein paar Jahren. Einige nehmen sogar bereits abgeschlossene Grabungsprojekte wieder auf, um nach „Bootsmarkern“ zu suchen. Und Funde wie die von Meadowcroft haben die Forscher veranlasst, ihr Augenmerk auch auf andere Dinge zu richten als nur auf Steine und Knochen. Beispielsweise fand Dillehay in Monte Verde Überreste von Tierhäuten, die vermutlich einmal als Zelt gedient haben, sowie geknotete Kordeln, die seiner Meinung nach zu deren Sicherung verwendet worden sind. Er rät seinen Kollegen, an völlig anders gearteten Orten nach Artefakten zu suchen als bisher: „In Höhlen und auf freien Flächen bleiben empfindlichere Artefakte selten erhalten. Monte Verde war ein Paradebeispiel, denn dort bedeckte eine Torfschicht vom nahe gelegenen Sumpf die Relikte und verhinderte, dass Luftsauerstoff sie angreifen konnte. Das heißt: Wir müssen nach feuchten Fundstätten Ausschau halten.“

Ein neues Bild von den Ur-Amerikanern zeichnet sich ab und gewinnt durch die Erforschung vergänglicher Artefakte immer deutlichere Konturen: Vor vielen tausend Jahren kannten die Menschen ihre Umwelt und wussten sie zu nutzen. Sie verstanden sich nicht nur darauf, hin und wieder ein Mammut zu erlegen, sondern auch auf den Fischfang. Sie wussten, wo es genießbare Beeren gibt, stell-

Archäologische Zahlenspiele

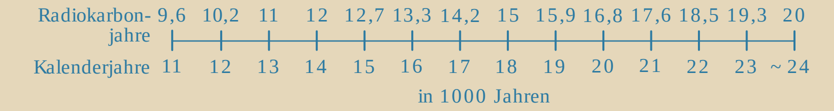
Radiokarbon-Daten müssen an den Kalender angepasst werden

Die ohnehin schon komplexe Frage, wann der Mensch erstmals amerikanischen Boden betrat, wird durch Datierungsprobleme weiter erschwert. Um das Alter von organischen Artefakten wie Knochen, Holzkohle oder Holz zu bestimmen, verlassen sich Archäologen im Allgemeinen auf die Radiokarbonmethode. Doch ein Radiokarbonjahr entspricht nicht immer einem Kalenderjahr.

Diese Art der Altersbestimmung basiert auf dem Umstand, dass alle Organismen Kohlenstoff zum Leben benötigen. Sie nehmen insbesondere zwei unterschiedliche Isotope davon auf: ^{14}C und ^{12}C (als Isotope bezeichnet man Varianten eines Elements, die dieselbe Anzahl von Protonen – bei Kohlenstoff immer sechs –, aber eine unterschiedliche Anzahl von Neutronen im Atomkern besitzen – hier acht und sechs). Solange ein Tier oder eine Pflanze lebt, entspricht das Verhältnis von ^{14}C zu ^{12}C in ihrem Gewebe demjenigen in der Atmosphäre. Stirbt der Organismus, nimmt es exponentiell ab, denn das erstere Isotop unterliegt radioaktivem Zerfall. Da die Zerfallsgeschwindigkeit des ^{14}C bekannt ist, können Forscher das Alter eines Objekts bestimmen.

Dabei ist jedoch zu beachten, dass das Verhältnis der beiden Isotope in der Atmosphäre über die Jahrtausende nicht konstant geblieben ist. Unabhängige Zeitskalen auf der Basis von Baumringen, Eisbohrkernen und der Uranium-Thorium-Methode ermöglichen die Umrechnung von Radiokarbonjahren in Kalenderjahre.

Unglücklicherweise ist eine solche Kalibrierung gerade für den hier interessanten Zeitraum von 10 000 bis 20 000 Jahren vor unserer Zeit mit besonderen Schwierigkeiten verbunden; jahrelang präsentierten Archäologen daher unkorrigierte Radiokarbonjahre. Jüngste Forschungen haben die Datierung dieser Epoche jedoch entscheidend vorangebracht; alle Jahreszahlen in diesem Artikel sind bereits in Kalenderjahre umgerechnet.



JENNIFER JOHANSEN

Kalibrierung tut Not: So ist die Ausgrabungsstätte Monte Verde 12 500 Radiokarbon-, aber 14 500 Kalenderjahre alt.

Monte Verde in Chile ist die älteste bekannte Stätte menschlicher Besiedelung auf dem amerikanischen Kontinent. An diesem Ort zwischen den Anden und dem Pazifik ließ sich vor fast 15000 Jahren eine Gruppe von ungefähr dreißig Menschen nieder. Der Archäologe Tom Dillehay (stehend) und seine Kollegen legten bei Ausgrabungen in der prähistorischen Siedlungsstätte eine Vielzahl menschlicher Artefakte frei.



KENNETH GARRETT, NATIONAL GEOGRAPHIC

ten Kleidung und Körbe aus Pflanzenfasern her und bauten den örtlichen Gegebenheiten angepasste Boote.

Inzwischen geriet das Standardmodell der Ur-Amerikaner noch weiter unter Beschuss. Seit das Alter von 14700 Jahren für Monte Verde von der internationalen Archäologengemeinde akzeptiert worden ist, steht die ketzerische Frage im Raum, ob die Clovis denn wirklich als Erste Amerika erreicht haben. Mike Waters von der texanischen A&M Universität bietet zwei weitere Arbeitshypothesen an: Es gab schon vorher versprengte Grüppchen in Nordamerika, die aber so gut wie keine Spuren hinterließen. Oder eine bislang noch unbekannte Kultur bevölkerte große Teile des Kontinents und harrt der Entdeckung. Einige Wissenschaftler verlegen die Ankunft der ersten Menschen in Amerika mittlerweile auf 15000 bis 20000 Jahre vor unserer Zeit.

In diesem Zusammenhang wird auch der Weg des Menschen in die Neue Welt heftig debattiert. Sofern die frühen Amerikaner in Kanus und Kajaks durch den Kontinent kreuzten, wäre es dann nicht ebenso gut möglich, dass die ersten Siedler von vornherein in Booten statt über die Landbrücke ankamen? Diese Vorstellung wurde von Archäologen jahrzehntelang abgelehnt, findet in den letzten Jahren jedoch immer mehr Unterstützung. Denn ansonsten wäre die „Völkerwanderung“ schon eher einem Volkslauf gleichgekommen: Um Monte Verde im Süden Chiles zu erreichen, mussten fast 20000 Kilometer zurückgelegt werden; doch erst vor 15700 Jahren war eine Durchquerung von Alaska und Kanada überhaupt möglich, zuvor bedeckte polares Eis das Land. Wenn nun die Siedlung von Monte Verde 14700 Jahre alt ist, blieb genau ein Jahrtausend für die gesamte Strecke. Zu Fuß wäre das Rekordzeit, durchaus vorstellbar hingegen bei einer Fortbewegung in Booten entlang der Pazifikküste.

Diese Möglichkeit vertritt der Archäologe Knut Fladmark von der Simon Fraser University im kanadischen Burnaby (British Columbia) seit den siebziger Jahren. „Mit Booten hätten die frühen Siedler den ganzen amerikanischen Kontinent sogar innerhalb von 100 Jahren durchqueren können. Rund 300 Kilometer in einem Monat zurückzulegen, halte ich für realistisch; wobei die Menschen zweifelsohne in den Wintermonaten eine Pause einlegten und vermutlich zudem an manchen Orten, die ihnen besonders günstige Bedingungen boten, für eine Generation verweilten.“

So reizvoll Fladmarks Theorie auch klingt, sie wird nicht einfach zu beweisen sein. Als am Ende der Eiszeit die Gletscher abschmolzen und der Meeresspiegel stieg, wurden Tausende Quadratkilometer entlang der amerikanischen Pazifikküste überflutet. Alte Lagerplätze und Artefakte wären heute in der Tiefe verborgen.

Deshalb suchen kanadische Archäologen neuerdings auf dem Grund des Pazifiks nach Überresten. Mit Echoloten haben Daryl Fedje von der kanadischen Nationalparkbehörde und seine Kollegen den Meeresgrund abgetastet und versunkene Flusslandschaften entdeckt. Nun fischen sie mit Netzen nach Artefakten. Vor der Küste British Columbias hoben sie aus rund 50 Metern Tiefe 1997 ein kleines Steinwerkzeug, dessen Alter Fedje auf 10200 Jahre schätzt. Es liefert zwar den Beweis, dass einst Menschen auf dem heute versunkenen Land lebten, doch es sagt nur wenig über die damalige Kultur.

Zurück zu dem kunstfertigen Speerspitzenmacher von Monte Verde. Seine Vorfahren könnten es also innerhalb von nur 100 Jahren bis an die Südspitze Chiles geschafft haben, vorausgesetzt, sie bewegten sich auf dem Wasserwege fort. Aber praktisch gesehen hätte die Gruppe dann kaum Zeit gehabt, sich an ihre neue Umgebung anzupassen.

„Wäre es nicht möglich, dass die ersten Siedler in Booten statt über die Landbrücke ankamen?“

Und genau hier sieht Professor Dillehay einen ganz entscheidenden Unterschied zwischen Theorie und Realität: „Die Menschen, die vor 14700 Jahren in Monte Verde lebten“, argumentiert er, „wussten genau, wo sie sich niederließen“. Sie waren lange genug in der Region, um sich in einer erstklassigen Lage einzurichten: Nicht weiter als eine Stunde entfernt boten Feuchtgebiete reichlich essbare Pflanzen; das Meer und die ers- ▶

Literaturhinweise

Phantome aus der Frühzeit. Von Michael Parfit in: National Geographic Deutschland. Dezember 2000, S. 96.

The Puzzle of the First Americans. Discovering Archaeology, Special Report, Januar/Februar 2000, S. 30–75.

Weitere Hinweise finden Sie unter ***www.spektrum.de/aktuelleshefl.html***

ten Ausläufer der Anden waren jeweils etwa einen Tagesmarsch entfernt. Ein solcher Ort im Einzugsbereich von drei nutzbaren Ökosystemen musste einfach mit Bedacht ausgesucht worden sein.

Dillehay fand eingetrocknete Seetang-Klumpen, die fast exakt die Form des menschlichen Mundraums aufweisen, sogar Abdrücke von Backenzähnen sind daran zu sehen. Vermutlich haben die Menschen sie wegen des hohen Jod-Gehalts gelutscht oder gekaut. Aus Funden von Mastodon-Knochen (einer ausgestorbenen Elefantenart) schließt der Archäologe, dass die Bewohner von Monte Verde Tieren in den nahen Sümpfen Fallen stellten. Mit deren Rippenknochen gruben sie möglicherweise in den Feuchtgebieten nach Wurzeln und Knollen.

Solch genaue Kenntnisse seiner Umgebung erwirbt der Mensch nicht von heute auf morgen, sondern eher in mehreren Generationen. Wieviel Zeit genau vergehen musste, bis die Bewohner von Monte Verde zu diesem Wissen gelangt sein konnten, ist jedoch schwer abzuschätzen. Nur zweimal hat der moderne Mensch einen unbewohnten Kontinent besiedelt – Australien und Amerika –, daher stehen uns nur wenig Vergleichsmöglichkeiten zur Verfügung. Doch Dillehay sieht dieses Thema in einem größeren Kontext: „Im Industal und in China vergingen Zehntausende von Jahren bis zur Entwicklung komplexer Zivilisationen. Die Ur-Amerikaner wären das bemerkenswerteste Volk der Welt gewesen, wenn sie innerhalb weniger tausend Jahre eine Kultur begründet hätten.“ Er nimmt daher an, dass der Grundstein der menschlichen Zivilisation in Amerika schon vor 20000 Jahren gelegt wurde.

Unterstützung bekommt diese These auch von Forschern anderer Fachrichtungen: Die Linguistin Johanna Nichols von der Universität von Kalifornien in Berkeley hält diese Zeitspanne für die untere Grenze, um die ungeheure Vielfalt der ur-amerikanischen Sprachen hervorzubringen, möglicherweise seien sogar 30000 Jahre vonnöten. Ein ähnliches Argument basiert auf der genetischen Diversität der Ureinwohner: Die Genetiker Theodore Schurr von der Southwest Foundation for Biomedical Research in San Antonio (Texas) und Douglas Wallace von der Emory University in Atlanta (Georgia) folgern aus dem Vergleich von genetischen „Markern“ der DNA bei heutigen indianischen und sibirischen Völkern, dass die Vorfahren der amerikanischen Ureinwohner Sibirien vor mindestens 30000 Jahren verlassen haben müssen.

„Es hat ganz den Anschein, als sei die Neue Welt schon seit Jahrtausenden ein Schmelztiegel gewesen“.

Wenn diese Annahmen stimmen sollten, würde dies nicht allein unser Bild von der Besiedlung Amerikas, sondern von der Ausbreitung des Menschen überhaupt verändern. Denn vor etwa 50000 bis 60000 Jahren soll nach heutigem Kenntnisstand der so genannte moderne Mensch von Afrika nach Asien gelangt sein, er breitete sich in den folgenden Zehntausenden von Jahren bis nach Europa aus. Die erste Besiedlung Amerikas rückt damit in den Dunstkreis der Evolution des Menschen. War sie Teil der Migration aus der afrikanischen Urheimat?

Diese Meinung vertritt jedenfalls der Anthropologe Walter Neves von der Universität São Paulo (Brasilien) für den südamerikanischen Raum. Er untersuchte den 13500 Jahre alten Schädel einer erwachsenen Frau aus dem Südosten Brasiliens. Neves Befund: Der Schädel weise mehr Ähnlichkeiten mit der Physiognomie heutiger Afrikaner und australischer Aborigines auf als mit der moderner Asiaten oder amerikanischer Ureinwohner. Der Anthropologe schließt daraus und aus der Untersuchung von etwa fünfzig weiteren, auf 8900 bis 11600 Jahre datierten Schädelfunden, dass unter den frühen Bewohnern Amerikas auch Menschen so genannter nicht-mongolider Rassen gewesen sein müssen. An eine direkte Besiedelung von Afrika oder Australien aus glaubt er aber nicht, sondern an eine Absplitterung jenes Menschenzuges, der sich langsam durch Asien bewegte und schließlich Australien erreichte. Andererseits gibt es Fossilien, die beweisen, dass vor 9000 Jahren mongolide Gruppen in Südamerika auftauchten.

Auch in Nordamerika lebten möglicherweise Einwanderer, die über das Meer kamen. Das in Kennewick (Washington) 1996 gefundene, 9500 Jahre alte Skelett eines Mannes zeigt eher Merkmale der Polynesier oder japanischen Ainu als der indianischen Völker. Es hat ganz den Anschein, als sei die Neue Welt schon seit Jahrtausenden ein Schmelztiegel der Rassen und Kulturen gewesen. Jene legendären Eiszeitjäger waren vermutlich nicht die ersten frühen Einwanderer – und wohl auch nicht die einzigen.

Archäologen durchkämmen Alaska auf der Suche nach Relikten aus der Vergangenheit; Geologen versuchen, den





KENNETH GARRET, NATIONAL GEOGRAPHIC (LINKS); MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG VON TOM DILLEHAY (RECHTS)

Menschliche Artefakte aus Monte Verde, Chile: links ein Holzstock zum Ausgraben von Knollen und Wurzeln, rechts die Überreste von Hölzern, an denen die Zelte der etwa dreißig Bewohner im Boden verankert wurden.



Die frühen Siedler Amerikas könnten den Kontinent in kleinen Booten aus Holz oder Tierhäuten erschlossen haben. Der Mensch beherrscht den Bau von Wasserfahrzeugen seit mindestens 40 000 Jahren, denn zu dieser Zeit hatte er bereits Australien erreicht.

genauen Zeitpunkt zu bestimmen, zu dem die Gletscher den Einwanderern erstmals einen Weg in das Gebiet Zentralkanadas und der USA freigaben. In Cactus Hill, einer Fundstätte in Virginia, scheinen die Forscher Menschen auf der Spur zu sein, die zwar zur Clovis-Kultur gehört haben, aber dort schon vor 18 000 Jahren lebten.

Vielversprechend ist auch Topper am Savannah-River. Dort gräbt der Archäologe Al Goodyear von der Universität South Carolina mit seinem Team unter einer bereits freigelegten Clovis-Fundstätte. In tieferen und somit älteren Sedimentschichten entdeckten die Wissenschaftler Artefakte, die sich völlig von denen der Clovis unterscheiden – kleine Steinklingen und Schabwerkzeuge, vermutlich zur Bearbeitung von Holz, Knochen und Horn –, hingegen keine einzige Speerspitze vom Clovis-Typ. Allem Anschein nach wurden die Sedimente von einem eiszeitlichen Fluss abgelagert, der auch im Bereich eines der Fundstätte nahe gelegenen Feuchtgebietes floss (die darüber liegenden Clovis-Schichten lassen sich geologisch deutlich abgrenzen). Direkt in der Siedlungsschicht haben sich leider keine organischen Reste erhalten, die zur Radiokarbondatierung dienen könnten. Proben aus dem Feuchtgebiet enthielten 25 000 bis 18 500 Jahre alte Pflanzenreste, stammten aber vermutlich aus einer noch tiefer liegenden Schicht. Nun bemühen sich Geologen, die zu Topper korrespondierenden Sedimente ausfindig zu machen, in der Hoffnung, darin datierbares Material zu finden. Zudem versuchen sie, die Veränderungen des Flussbettes im Laufe der Jahrtausende zu rekonstruieren, um daraus eine grobe Abschätzung auf das Alter der Vor-Clovis-Siedlung zu gewinnen.

Ähnliche Probleme haben auch andere Forscher. In Südamerika tätige Archäologen munkeln von möglicherweise 30 000 Jahre alten Siedlungsplätzen. Unter ihnen ist auch Tom Dillehay, doch er bleibt vorsichtig und verweist darauf, dass diese äußerst kontroversen Datierungen erst noch durch weitere Funde aus eben jener Epoche bestätigt werden müssten.

Eine Frage werden die Wissenschaftler aber niemals klären können: Wie haben die ersten Siedler das Amerika ihrer Zeit erlebt? War ihnen bewusst, dass sie als Pioniere eine neue, menschenleere Welt durchstreiften? Und wenn dies der Fall war: Verspürten sie gelegentlich Entdeckerfreude oder ließ ihnen die Sorge um die tägliche Nahrung dafür keine Zeit? Für Dillehay ist der Fall klar. Für ihn waren diese Männer und Frauen Teilnehmer eines Abenteuers, das höchstens noch dem Aufbruch der Menschheit ins All vergleichbar wäre. „Wenn Menschen durch eine Gegend streiften, nutzten sie oft dieselben Höhlen und Felsdächer als Unterkunft wie andere vor ihnen, einfach weil diese sich dafür gut eigneten. Und jede Gruppe hinterließ ihre Spuren. Es muss Momente gegeben haben, wo die Pioniere an Orte kamen, die noch kein Mensch zuvor betreten hatte; wo ihnen bewusst wurde: „Wir sind die Ersten.“ ■

Sasha Nemecek *ist Redakteurin bei Scientific American.*

Das kälteste Gas im Universum

Seit kurzem gelingt es, winzige Gaswölkchen knapp über dem absoluten Nullpunkt in einen kollektiven Quantenzustand zu versetzen. Solche Bose-Einstein-Kondensate werden nun intensiv erforscht und auf mögliche Anwendungen untersucht.

VON GRAHAM P. COLLINS

DAVID FEDER UND PETER KETCHAM, NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (NIST)

Wenn Superflüssigkeiten rotieren, bilden sich so genannte Quantenwirbel. Die theoretische Simulation zeigt vier Wirbel, die sich durch ein Bose-Einstein-Kondensat schlängeln, sowie zwei neue Wirbel, die am Rand entstehen. Die Farben zeigen die quantenmechanische Phase um jeden Wirbel an.

Angenommen, Sie schnurren durch Zauberei auf die Größe eines Moleküls zusammen und können die Bewegung einzelner Atome in einem Gas beobachten. Die Partikel vor Ihnen gleichen unzerbrechlichen Glasmurmeln, die in einem nahezu leeren Raum umherflitzen und unaufhörlich voneinander abprallen. Vielleicht fällt Ihnen bei dem Anblick die Beschreibung des idealen Gases aus Ihrer Schulzeit ein.

Auf einmal bemerken Sie, dass die Murmeln weniger hektisch hin und her rasen. Aha! Irgendein Prozess kühlt das Gas allmählich ab. Zunächst verlieren die Murmeln nur an Geschwindigkeit und rücken näher zusammen: Die Dichte des Gases nimmt beim Abkühlen zu. Aber dann sehen Sie zu Ihrer Überraschung, dass die Murmeln selbst sich verändern. Die Größe der langsamsten wächst auf das Tausendfache, und ihre zuvor spiegelklare Oberfläche ist nun ganz unscharf geworden. Diese immer schemenhafteren Atome durchdringen einander, manchmal ohne Ablenkung, dann wieder mit einem Rückstoß, als wären sie mit etwas Hartem im Innern kollidiert.

Direkt vor Ihnen überlappen sich zwei der langsamsten, verschwommensten Atome und scheinen zu einem einzelnen größeren Bläschen zu verschmelzen. Dieses Ellipsoid absorbiert weitere Atome einzeln, paarweise oder gleich im Dutzend, und mit verblüffender Plötzlichkeit bleibt von all dem Wirrwarr nur eines übrig: ein riesiger bewegungsloser Zeppelin. Was ist mit all den einzelnen Atomen passiert? Was für ein mysteriöses Objekt ist das?

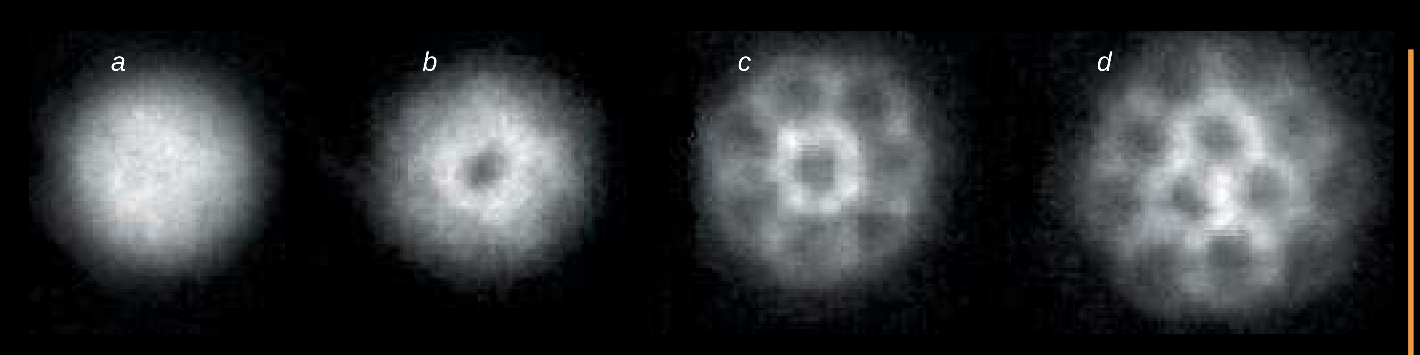
Vor Ihnen schwebt ein rein quantenmechanisches Gebilde, ein so genanntes Bose-Einstein-Kondensat, die kälteste Form eines Gases im Universum. Und obwohl die atomaren Bestandteile in diesem Gas immer noch existieren, haben sie jegliche Individualität verloren.

Meist bleiben die bizarren Eigenschaften der Quantenmechanik hinter der Fassade der klassischen Physik verborgen. Wir verwechseln diese Fassade mit der Wirklichkeit selbst, und daher rühren unsere alltäglichen Vorstellungen, wie die Welt funktioniert: Für uns hat jedes Objekt seine wohldefinierte Position, Bewegung und Identität, und sein Verhalten ist durch deterministische Gesetze exakt festgelegt.

Hingegen widersetzt sich das Wesen der Quantenmechanik unserer Anschauung: Ort und Bewegung von Teilchen sind grundsätzlich ungewiss und von Wahrscheinlichkeiten bestimmt. Sogar die Vorstellung, dass die Dinge eine unverkennbare Identität besitzen, muss für Quantenteilchen aufgegeben werden. Ein Bose-Einstein-Kondensat ist eine Ansammlung von Materie, die in kaum je zuvor beobachteter Deutlichkeit einem rein quantenmechanischen Verhaltensmuster folgt.

Besonders bemerkenswert ist das enorme Ausmaß solcher Kondensate – 100000-mal ausgedehnter als die größten gewöhnlichen Atome, sogar größer als menschliche Zellen. Daher können die Physiker das Quantenverhalten eines Kondensats in normalerweise undenkbarer Anschaulichkeit beobachten. So betont Steven L. Rolston vom National Institute of Standards and Technology (NIST) in Gaithersburg (US-Bundesstaat Maryland): „Unsere Aufnahmen von Bose-Einstein-Kondensaten sind echte Bilder von quantenmechanischen Wellenfunktionen – wir können wirklich die Quantenmechanik in Aktion erleben."

Gasförmige Bose-Einstein-Kondensate wurden zum ersten Mal 1995 im Labor erzeugt – immerhin erst siebzig Jahre, nachdem Albert Einstein, ausgehend von Arbeiten des indischen Physikers Satyendra Nath ▶



KIRK MADISON, ECOLE NORMALE SUPERIEURE, PARIS

Ein Kondensat aus Rubidium-Atomen wird durch „Umrühren" mit einem rotierenden Laser in Drehung versetzt und bildet allmählich ein regelmäßiges Wirbelgitter aus. Anfangs rotiert das Kondensat überhaupt nicht (*a*), bis das Umrühren stark genug ist, einen vollständigen Wirbel zu erzeugen (*b*), in dem jedes Atom ein Drehimpulsquant besitzt. Schnelleres Rühren erhöht die Drehung und erzeugt weitere Quantenwirbel – in den hier gezeigten Fällen acht (*c*) und zwölf (*d*). In den dunklen Wirbelkernen ist die Rotation am schnellsten und die Gasdichte am geringsten.

Makroskopische Quantenzustände

Verwandte des Bose-Einstein-Kondensats

Die 1995 erzeugten Kondensate waren nicht die ersten Beispiele für Bose-Einstein-Kondensation. Zu ihren bereits länger bekannten Verwandten gehören:

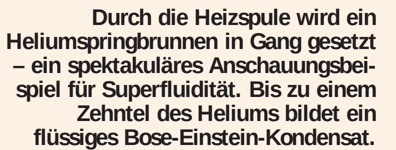
Superflüssiges Helium. Flüssiges Helium-4 wird bei Abkühlung auf weniger als 2,2 Kelvin superfluid. Die Flüssigkeit fließt ohne jede Viskosität und bietet unter anderem das verblüffende Schauspiel des Helium-Springbrunnens (rechts). Der Grund ist, dass bei einem Teil – bis zu 10 Prozent – der Heliumatome Bose-Kondensation eintritt. Wegen des starken Zusammenhalts der Atome in der Flüssigkeit ist es kaum möglich, die Quanteneigenschaften des Kondensat-Anteils theoretisch und experimentell zu untersuchen.

Laser. Die Laserstrahlung hat viel mit einem Bose-Einstein-Kondensat gemein. In gewöhnlichem Licht – etwa dem einer Glühbirne – sind die Lichtwellen nicht synchronisiert; doch in einem Laser schwingen alle Wellen in Phase, das heißt ihre Berge und Täler stimmen exakt überein. Quantenphysikalisch ausgedrückt gehören die Lichtquanten – die Photonen – zum Teilchentyp der Bosonen, die bestrebt sind, denselben Quantenzustand einzunehmen. Der Verstärkungsprozess, der einen Laserstrahl erzeugt, macht sich diese Neigung von Bosonen zu Nutze.

Supraleiter. Die Bose-Kondensation von Elektronenpaaren liegt der Supraleitung – dem widerstandsfreien Stromfluss – zu Grunde. Da ungepaarte Elektronen nicht Bosonen sind, sondern Fermionen, können sie kein Bose-Kondensat bilden. Schwach gebundene Elektronenpaare entstehen nur unter bestimmten Bedingungen, zum Beispiel in Aluminium unterhalb von 1,2 Kelvin. Solche Paare sind Bosonen und bilden bereitwillig ein Quantenkondensat. Durch den Paarungsmechanismus und die elektrische Ladung der Paare unterscheiden Supraleiter sich stark von einem neutralen, verdünnten Kondensat. Ein ähnlicher Paarungs- und Kondensationsprozess tritt in superfluidem Helium-3 auf, dessen Atome Fermionen sind.

Exzitonen. In Halbleitern kann sich ein fehlendes Elektron wie ein positiv geladenes Teilchen – ein „Loch“ – verhalten. Werden ein Loch und ein Elektron durch einen Laserpuls erzeugt, so können beide für kurze Zeit einen gemeinsamen Paarzustand bilden, ein so genanntes Exziton. Im Jahre 1993 wurde beobachtet, dass Exzitonen in einem Kupferoxid-Halbleiter ein kurzlebiges gasförmiges Kondensat bilden können.





Durch die Heizspule wird ein Heliumspringbrunnen in Gang gesetzt – ein spektakuläres Anschauungsbeispiel für Superfluidität. Bis zu einem Zehntel des Heliums bildet ein flüssiges Bose-Einstein-Kondensat.

JOHN F. ALLEN, UNIVERSITY OF ST. ANDREWS

Bose, das Phänomen vorhergesagt hatte (siehe „Die Bose-Einstein-Kondensation“ von Eric A. Cornell und Carl E. Wieman, Spektrum der Wissenschaft 5/1998, S. 44). Die Experimentatoren produzieren diese Kondensate in so genannten Atomfallen – Anordnungen von Laserstrahlen und Magnetfeldern, die eine stark verdünnte Wolke von Atomen in einer Vakuumkammer einfangen, festhalten und abkühlen (siehe Kasten auf Seite 55). Der renommierte Atomphysiker Daniel Kleppner vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) nennt die Erzeugung dieser Kondensate „die aufregendste Einzelentwicklung in der Atomphysik seit Entwicklung des Lasers“.

Forschergruppen in aller Welt, einige geleitet von Nobelpreisträgern und künftigen Laureaten, erforschen seit fünf Jahren mit Feuereifer das exotische Gebiet, das durch diesen Durchbruch zugänglich geworden ist. Sie tasten die Kondensate mit Laserstrahlen ab, variieren die Fallen, die sie zusammenhalten, und beobachten, wie das Gas gemäß den Quantengesetzen hüpft, schaukelt und vibriert.

Doch Kondensate sind nicht nur beispielhafte Quantensysteme, sondern verkörpern auch eine eigentümliche Mischung mehrerer großer Forschungsgebiete: Atomphysik (einzelne Atome), Quantenoptik (Laserstrahlen und ihre Wechselwirkung) sowie Vielteilchenphysik (Festkörper, Flüssigkeiten und Gase) einschließlich der technologisch wichtigen Erforschung des Elektronenflusses in Metallen und Halbleitern.

Superflüssiges Helium

Der vorliegende Artikel vermag nur ein paar Beispiele für die erstaunlichen experimentellen Kunststücke zu geben, die den Physikern mit Bose-Einstein-Kondensaten gelungen sind. Die Ergebnisse beleuchten einige Facetten dieser Quantenobjekte: ihr Verhalten als Superflüssigkeit wie in flüssigem Helium, als präzise kontrollierbares atomares Gas und als eine Art Laserstrahl, der statt aus Licht aus Materie besteht.

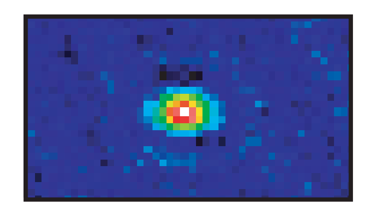
Wird flüssiges Helium auf weniger als 2,2 Kelvin (Grad über dem absoluten Temperaturnullpunkt) abgekühlt, so nimmt es ein höchst merkwürdiges Verhalten an. Wie der sowjetische Physiker Pjotr Kapiza und der Kanadier John F. Allen 1938 entdeckten, wird Helium unterhalb dieser Temperatur superfluid: Es fließt ohne jede Viskosität und vermag am Rand eines offenen Behälters empor und aus ihm heraus zu kriechen. Diesen Effekten liegt die Bose-Einstein-Kondensation zu Grunde (siehe Kasten auf dieser Seite).

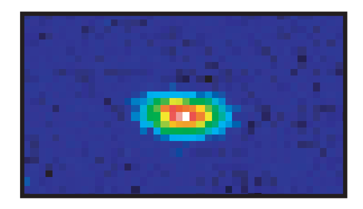
Die Experimentalphysiker wüssten nur zu gern, ob auch die gasförmigen Kondensate Superfluidität zeigen, aber die Antwort zu finden erweist sich als ausgesprochen schwierig. Superflüssiges Helium lässt sich in so großen Mengen produzieren, dass man sein seltsames Verhalten mit bloßem Auge beobachten kann. Die neuen Kondensate sind hingegen winzige Gaswölkchen, kaum gehaltvoller als Vakuum, und werden von Magnetfeldern höchstens ein paar Minuten lang zusammengehalten. Was würde es für einen derart hauchzarten Dampf überhaupt bedeuten, superfluid zu sein?

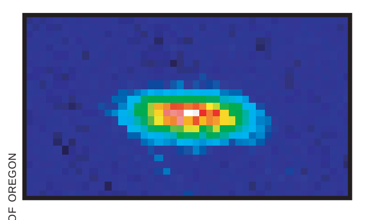
Ein einzigartiger Effekt sind die in einer rotierenden Superflüssigkeit entste-

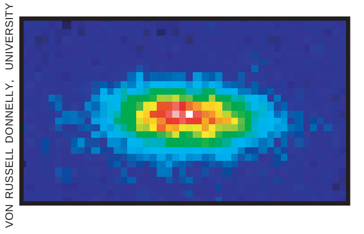
henden Quantenwirbel. Wenn man einen Eimer mit gewöhnlichem flüssigem Helium auf einem Drehtisch rotieren lässt, folgt nach einer Weile das gesamte Helium – ganz ähnlich wie Wasser – der Rotation des Eimers. Hingegen bilden sich in superfluidem Helium separate, regelmäßig angeordnete Quantenwirbel. Der kleinstmöglichen Rotation entspricht ein einziger Wirbel, der sich in der Mitte des Heliums rasch und am Behälterrand nur langsam dreht. Wenn man versucht, die Superflüssigkeit noch langsamer rotieren zu lassen, bleibt sie völlig bewegungslos.

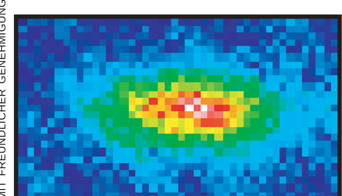
Diese Effekte treten auf, weil die Atome im Kondensat stets in ein und demselben Quantenzustand sind und daher alle den gleichen Drehimpuls besitzen müssen. Doch der Drehimpuls kann nur diskrete Quantenwerte annehmen. Im bewegungslosen Zustand haben alle Atome Drehimpuls null; in einem Wirbel besitzen sie gerade ein Drehimpulsquant.











MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG VON RUSSELL DONNELLY, UNIVERSITY OF OREGON

Die zwischen den Atomen eines Kondensats wirkenden Kräfte verändern dessen Größe und Gestalt. Hier variierten die Forscher die Kräfte von stark abstoßend (oben) bis fast null (unten). Werden die Kräfte weiter verändert, bis sie schließlich schwach anziehend werden, so kollabiert das Kondensat und explodiert wie eine winzige Supernova.

Im Jahre 1999 produzierten Carl E. Wieman und Eric A. Cornell am JILA (Joint Institute for Laboratory Astrophysics) in Boulder (Colorado) erstmals Wirbel in Bose-Einstein-Kondensaten mit einer Methode, die James E. Williams und Murray J. Holland vorgeschlagen hatten. Sie erzeugten zunächst ein doppeltes Kondensat: zwei überlappende Kondensate aus demselben Element (Rubidium), aber in etwas unterschiedlichen Quantenzuständen.

Die Forscher bestrahlten das doppelte Kondensat mit Mikrowellen und einem Laser und erreichten, dass einem der Kondensate genau die zur Ausbildung eines Wirbels erforderliche quantenmechanische Phase aufgeprägt wurde. Dieser Prozess, der für einen klassischen Physiker gar nicht aussieht, als würde auch nur ein Atom bewegt, erzeugt den rotierenden Wirbelzustand. Indem die Forscher beobachteten, wie die beiden Kondensate miteinander interferierten, konnten sie die Quanteneigenschaften des Wirbels direkt nachweisen; dies war in sechzig Jahren Arbeit mit superfluidem Helium noch nie gelungen.

Später im selben Jahr vermochte Jean Dalibard an der École Normale Superieure in Paris erstmals quasi mit der Methode des rotierenden Eimers Wirbel zu erzeugen. Dalibards Gruppe bewegte einen Laserstrahl rund um den Rand der Atomfalle und schuf damit eine Art rotierende Verzerrung ihrer Gestalt. Diese Forscher konnten Anordnungen von bis zu 14 Wirbeln abbilden. Im September 1999 publizierten sie Drehimpuls-Messungen: In Übereinstimmung mit der Theorie ist der Wert null, bis der erste Wirbel erscheint, und springt dann sofort auf ein ganzes Drehimpulsquant.

Die Quantendynamik solcher Wirbel ist nicht nur für die Grundlagenforschung interessant, sondern auch für die Technik der Hochtemperatur-Supraleitung: Magnetfelder durchdringen diese Materialien, indem sie darin eine Anordnung von elektrischen Stromwirbeln erzeugen. Die Bewegung derartiger Flusswirbel führt zu Leistungsverlusten und macht damit die attraktivste Eigenschaft von Supraleitern – keinerlei elektrischen Widerstand aufzuweisen – zunichte. Untersuchungen an Bose-Einstein-Kondensaten könnten helfen, dieses Problem in den Griff zu bekommen.

Glossar

Fermionen sind Quantenteilchen, die ihresgleichen meiden: Zwei Fermionen können niemals am selben Ort denselben Quantenzustand einnehmen. Zu ihnen zählen Elektronen, Protonen und Neutronen.

Bosonen sind das schiere Gegenteil: Sie streben danach, sich zu möglichst vielen in demselben Quantenzustand zu versammeln. Zu ihnen gehören die Photonen (Lichtquanten). Auch zusammengesetzte Teilchen, insbesondere Atome, sind entweder Bosonen oder Fermionen. Ein Atom aus einer geraden Anzahl von Protonen, Neutronen und Elektronen ist ein Boson.

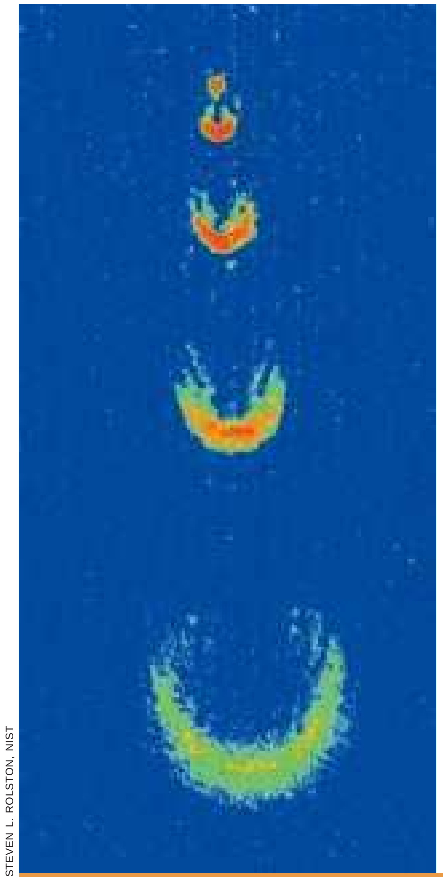
Bose-Einstein-Kondensation tritt auf, wenn eine Ansammlung von gleichartigen Bosonen genügend abgekühlt und verdichtet wird, ohne einen Festkörper zu bilden. Im Kondensat nehmen alle Bosonen ein und denselben Quantenzustand ein.

Manipulierbare Wechselwirkungen von Atomen

In superfluidem Helium haben die Wirbelkerne nur ein Zehntel Nanometer (millionstel Millimeter) Durchmesser und lassen sich darum kaum im Detail untersuchen. Doch die Kerne der in Colorado und Paris beobachteten Wirbel sind etwa 5000-mal größer, denn gasförmige Kondensate haben im Vergleich zu flüssigem Helium extrem geringe Dichte, und ihre Atome treten nur sehr schwach in Wechselwirkung miteinander.

An der Dichte und den Wechselwirkungen von flüssigem Helium lässt sich so gut wie gar nichts ändern, aber die Dichte von gasförmigen Bose-Einstein-Kondensaten kann durch Straffen oder Lockern der Magnetfallen, die das Gas festhalten, variiert werden. Außerdem ist es möglich, die Wechselwirkungen in gasförmigen Kondensaten buchstäblich durch Drehen an einem Einstellknopf zu verändern. Diese Fähigkeit ist der Traum jedes Experimentators: Man stelle sich vor, wie die chemische Forschung aussä- ▶





STEVEN L. ROLSTON, NIST

Atomlaser sind im Wesentlichen Kondensate, die sich bewegen. Da alle Atome des Kondensats im selben Quantenzustand sind, entsprechen sie den Lichtquanten der kohärenten Strahlung, die ein optischer Laser erzeugt. Der erste Atomlaser (links) wurde von der Schwerkraft „angetrieben". Am oberen Bildrand ist das Kondensat als kleines Kügelchen zu erkennen; es wird mit gepulsten Radiowellen bestrahlt, die Teile des Kondensats – die sichelförmigen Gebilde – freisetzen. Die Abstoßung zwischen den Natriumatomen ist verantwortlich für die Form und die Expansion dieser Gebilde. Im ersten gerichteten Atomlaser (oben) wurden die Atome mit Laserstrahlen seitlich aus der Falle herausgetrieben.

he, wenn wir die Bindungen zwischen den Atomen nach Belieben schwächen oder verstärken könnten.

Die Atome in einem gasförmigen Kondensat erfahren je nach Sorte eine schwache wechselseitige Abstoßung oder Anziehung. Beispielsweise stoßen Natrium-, Rubidium-87-oder Wasserstoff-Atome ihresgleichen ab. Lithium-7- und Rubidium-85-Atome dagegen wirken anziehend auf einander. Obwohl diese Kräfte winzig sind, modifizieren sie zahlreiche Eigenschaften eines Kondensats – zum Beispiel seine innere Energie, seine Größe, seine Schwingungsmoden und sein Entstehungstempo. Vor allem stabilisiert Abstoßung ein Kondensat, während Anziehung destabilisierend wirkt. Darum werden in Experimenten mit abstoßendem Rubidium-87 oder Natrium stets Millionen Atome gleichzeitig kondensiert, und die Kondensate können zwanzigmal größer sein als wenn es keine Abstoßung gäbe. Umgekehrt begrenzt die Anziehung die Lithium-7-Kondensate von Randall G. Hulets Gruppe an der Rice University in Houston (Texas) auf etwa 1500 Atome. Oberhalb dieser Größe zieht sich das Kondensat zusammen und wird so dicht, dass die Atome durch Kollisionen aus der Falle herausgeschleudert werden. Diese Ergebnisse lassen sich neuerdings durch raffinierte theoretische Modelle gut erklären, aber noch Anfang der neunziger Jahre bezweifelten die Physiker, dass einander anziehende Atome überhaupt ein Kondensat zu bilden vermögen.

Die Wechselwirkungen der Atome können durch so genannte Feshbach-Resonanzen verändert werden; der Kernphysiker Herman Feshbach vom MIT untersuchte in den sechziger Jahren ein analoges Phänomen bei kollidierenden Atomkernen. In einem ultrakalten Gas verformt ein starkes Magnetfeld die Atome und bewirkt bei bestimmten Feldstärken eine Resonanz zwischen zwei kollidierenden Atomen. In einem Kondensat spüren die Atome die Wirkung dieser Resonanzen fortwährend, weil ihre Wellenfunktionen einander überlappen; die Resonanzen modifizieren die Kräfte zwischen den Atomen, wobei die stärksten Effekte in der Nähe der Resonanz-Magnetfeldstärke auftreten.

Eine Schwierigkeit ist freilich, dass ein starkes Magnetfeld den magnetischen Einschluss der Atome zunichte machen kann. Wolfgang Ketterles Gruppe am MIT löste dieses Problem 1998, indem sie Natrium-Kondensate aus einer Magnetfalle in eine Laserfalle übertrug. Aber obwohl es der MIT-Gruppe gelang, den Effekt der Feshbach-Resonanzen zu beobachten, waren detailliertere Untersuchungen unmöglich: Als das Magnetfeld auf einen Wert in der Nähe einer Resonanz hochgefahren wurde, zerfiel das Natrium-Kondensat zur großen Überraschung der Forscher innerhalb weniger tausendstel Sekunden.

Langlebige Kondensate mit variierbarer Wechselwirkung wurden Anfang 2000 von Cornell und Wieman mittels Rubidium-85 und einer konventionellen Magnetfalle entwickelt. Normalerweise verhindert die anziehende Wechselwirkung von Rubidium-85 ein Wachstum des Kondensats auf mehr als kümmerliche 80 Atome. Doch indem die Gruppe aus Colorado mit Hilfe der Feshbach-Resonanzen die Kräfte abstoßend machte, gelang es ihr, stabile Kondensate aus bis zu 10 000 Atomen und mit einer Lebensdauer bis zu zehn Sekunden herzustellen.

Der spektakulärste Effekt trat auf, als die Gruppe die künstliche Abstoßung allmählich reduzierte. Wie theoretisch vorhergesagt, schrumpfte das große Kondensat zusammen und wurde dichter. Schließlich – etwa fünf Millisekunden, nachdem die Wechselwirkung wieder attraktiv geworden war – explodierte das Kondensat; Wieman taufte dieses Phänomen wegen seiner vagen Ähnlichkeit mit der Implosion, die explodierende Sterne antreibt, scherzhaft „Bose-Nova". Die Explosionen schleuderten ungefähr ein Drittel der Kondensat-Atome aus der Falle und ließen ein Restkondensat zurück, das von einer heißen Atomwolke umgeben war – sofern man eine Temperatur von einem zehnmillionstel Grad heiß nennen mag.

Eine mögliche Anwendung der Wechselwirkungsabstimmung in Kondensaten ist das Erzeugen spezieller Atomstrahlen, so genannter Atomlaser. Gewöhnliche Atomstrahlen finden bereits allerlei wissenschaftliche und industrielle Anwendungen, so in Atomuhren, bei der Präzisionsmessung von Naturkonstanten und bei der Produktion von Computer-Chips. Aber all diesen Strahlen mangelt es an der Intensität und Kohärenz eines Atomlasers – so wie es gewöhnlichem Licht an der Stärke und Kohärenz und somit der vielfältigen Verwendbarkeit eines Laserstrahls mangelt. Mit Kohärenz ist gemeint, dass alle Atome oder Photonen eines Strahls sich in quantenphysikalischem Gleichtakt bewegen: Die zugehörigen Wellen schwingen in Phase.

Vom Kondensat zum Atomlaser

Es dauerte Jahrzehnte, bis der Laser – 1960 lediglich ein esoterisches Experimentiergerät – zum fast allgegenwärtigen Bestandteil der Unterhaltungselektronik wurde. Einige Forscher glauben, dass dem Atomlaser in kommenden Jahrzehnten eine ähnlich vielfältige Zukunft winkt. Allerdings türmen sich gewaltige Hindernisse auf diesem hypothetischen Weg, vor allem weil Atomstrahlen – anders als Laserstrahlen – zu ihrer Fortpflanzung ein Vakuum brauchen.

Die ersten Atomlaser erzeugten ihre Pulse und Strahlen ganz anders als optische Laser; deshalb meinten manche sogar, die Bezeichnung Laser sei in diesem Fall irreführend. Im Wesentlichen ist ein Atomlaser nichts anderes als ein kohärentes und sich frei bewegendes Stück Bose-Einstein-Kondensat. Die Atome eines Kondensats werden in der Magnetfalle festgehalten, weil sie auf Grund ihres Spins selbst als winzige magnetische Dipole wirken. Wenn präzise abgestimmte Radiowellen die atomaren Spins umkippen, werden die Atome gegen das umgebende Feld immun. Diesen Effekt nutzte Ketterle 1997 am MIT, um den ersten Atomlaser zu verwirklichen. Er bestrahlte ein Natrium-Kondensat mit ▶

Quanten-Kühler

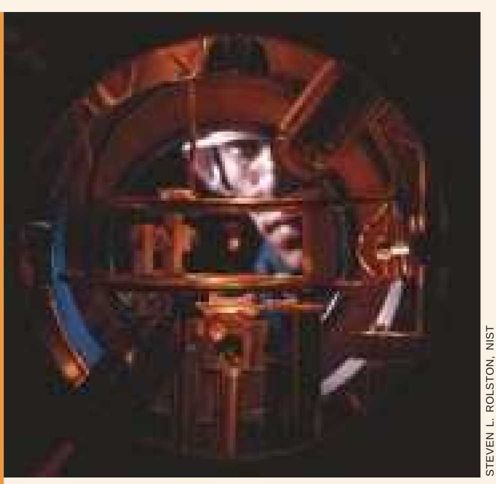
Geräte zum Kühlen und Einfangen von Atomen

Laserkühlung. Um ein gasförmiges Bose-Einstein-Kondensat zu erzeugen, muss ein verdünntes atomares Gas in einer Vakuumkammer auf extrem tiefe Temperaturen gekühlt werden. Der erste Schritt ist fast immer die Laserkühlung: Laserstrahlen bremsen die Bewegung der Atome so stark ab, dass deren Temperatur nur noch rund 50 Mikrokelvin (millionstel Grad über dem absoluten Nullpunkt) beträgt.

Magneto-optische Falle. Sie kombiniert Laserkühlung und Einfangen von Atomen durch Magnetfelder. Die Magnetfelder komprimieren das Gas. Oft werden zwei solche Fallen hintereinander verwendet – die erste vor allem zum Einfangen, die zweite speziell zum Kühlen der Atome.

Verdampfungskühlung. Die letzte Kühlstufe bei Experimenten an Bose-Einstein-Kondensaten ähnelt dem Abkühlen einer Tasse Kaffee: Während ein Magnetfeld die Atome zusammenhält, werden die heißesten Atome kontinuierlich entfernt, sodass immer kälteres Gas zurückbleibt. Im Gegensatz zur Laserkühlung funktioniert die Verdampfungskühlung am besten bei höheren Dichten.

TOP-Falle. Die *time-averaged orbiting potential trap* (Falle mit zeitlich gemitteltem kreisendem Potential), die Eric A. Cornell und Carl E. Wieman 1995 zur Erzeugung des ersten gasförmigen Kondensats verwendeten, wurde von verschiedenen Gruppen übernommen. Die Magnetspulen erzeugen ein Feld, das allerdings an einem Punkt verschwindet; von dort könnten darum Atome aus der Falle entweichen. Durch schnelles Rotieren des Feldes werden die Atome jedoch innerhalb der Kreisbahn des Lecks eingeschlossen und bilden beim Kondensieren ein Ellipsoid.



STEVEN L. ROLSTON, NIST

Kristian Helmerson vom National Institute of Standards and Technology in Gaithersburg (Maryland) beobachtet leuchtende Natriumatome, die in einer magneto-optischen Falle zusammengehalten werden. Ein durch Stromspulen erzeugtes Magnetfeld sowie aus sechs Richtungen eindringende Laserstrahlen bewirken Einschluss, Kühlung und Kompression des atomaren Gases.

Ioffe-Pritchard-Fallen. Solche Geräte – benannt nach dem russischen Physiker M. S. Ioffe, dessen Ioffe-Falle zum Einfangen von Plasma aus geladenen Ionen diente, und David Pritchard vom MIT – erzeugen ein Einfangfeld ohne Leck. Sie sind die wichtigste Alternative zu den TOP-Fallen. Ihre Magnetfelder werden mittels Strom erzeugt, der durch vier parallele Stäbe fließt oder durch Spulen, die wie der Buchstabe D, die Nähte eines Baseballs oder vierblättrige Kleeblätter geformt sind.

Permanentmagnet-Falle. Dieser Typ von Ioffe-Pritchard-Fallen erzeugt die Felder mit Permanentmagneten. Randall G. Hulets Gruppe an der Rice University in Houston (Texas) verwendet diesen Fallentyp, um Kondensate in Lithium zu produzieren. Da die Permanentmagnete nicht ausgeschaltet werden können, lässt das Kondensat sich nur am Entstehungsort beobachten.

gepulsten Radiowellen. Die Atome mit umgeklapptem Spin fielen einfach aus der Falle heraus; so entstanden sichelförmige Kondensat-Pakete, die nur durch die Schwerkraft in Bewegung versetzt wurden.

Ende 1998 konstruierte die Gruppe von Theodor Hänsch an der Universität München ein ähnliches System, das einen kontinuierlichen Strahl aus Rubidium-Atomen emittierte (siehe Spektrum der Wissenschaft 7/2000, S. 23). Die Münchner Gruppe schätzte, dass ihr Atomstrahl mehr als eine Million Mal intensiver war als ähnliche – aber nichtkohärente – Atomstrahlen, die mit anderen Techniken erzeugt worden waren.

Etwa zur selben Zeit bauten William D. Phillips und Steve Rolston am NIST erstmals einen Atomlaser, der nicht nur in Abwärtsrichtung funktionierte. Optische Laserpulse trieben Atome aus dem Kondensat und durch ein kreisendes Loch am Rand der Falle ins Freie. Eine exakt mit der Rotation des Lochs synchronisierte Folge von Laserpulsen schuf einen eng gebündelten und praktisch kontinuierlichen Strahl; ein Bericht sprach von einer „atomaren Strahlenkanone mit laserähnlicher Präzision“.

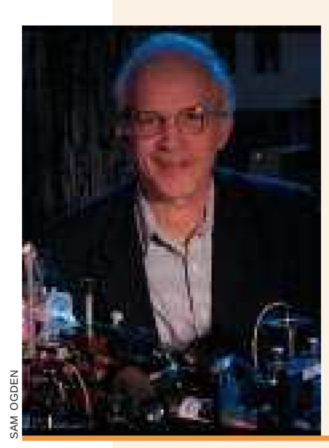
Das „a“ in Laser steht für „*amplification*“ (Verstärkung), aber bei den bisher beschriebenen Atomlasern findet die einzige nennenswerte Verstärkung bei der anfänglichen Erzeugung der Bose-Einstein-Kondensate statt, wenn die Atome im Laufe der Kondensation „verstärkt“ den gemeinsamen Quantenzustand besetzen. Eine echte Verstärkung der Atomlaser-Strahlen – eine so genannte Materiewellen-Verstärkung – gelang erst Ende 1999 einer von Ketterle und Pritchard geleiteten Gruppe am MIT sowie unabhängig davon Takahiro Kuga an der Universität Tokio.

Wasserstoff-Papst

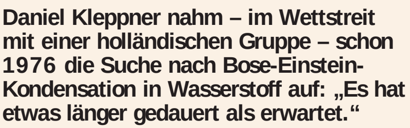
Der Pate des Bose-Einstein-Kondensats

Ein oder zwei Jahre nach der Erzeugung der ersten Kondensate wurde Daniel Kleppner bei Konferenzen als „Pate der Bose-Einstein-Kondensate“ vorgestellt. Als deren „Vater“ konnte er schließlich nicht durchgehen, denn seine eigene Gruppe hatte leider noch immer kein Kondensat erzeugt. Und doch hielt er seine väterliche Hand über dem Gebiet – als Pionier, als weiterhin aktiver Teilnehmer und als Mentor der jungen Aufsteiger, die ihm den Heiligen Gral weggeschnappt hatten.

Die drei Gruppen, die 1995 und 1996 die ersten Quantenkondensate schufen, wurden von Kleppners Schülern und deren Schülern geleitet. Wieman hatte Anfang der siebziger Jahre als Student in Kleppners Labor gearbeitet. Cornell war ein Doktorand von Pritchard, der wiederum ein Doktorand von Kleppner war. Ketterle arbeitete unter Pritchard zunächst an kalten Atomen. Hulet war Doktorand in Kleppners Gruppe, ebenso wie der Nobelpreisträger Phillips, dessen Gruppe 1998 ein Bose-Einstein-Kondensat erzeugte.



SAM OGDEN



Daniel Kleppner nahm – im Wettstreit mit einer holländischen Gruppe – schon 1976 die Suche nach Bose-Einstein-Kondensation in Wasserstoff auf: „Es hat etwas länger gedauert als erwartet.“

Als Kleppners frühere Studenten ihre spektakulären Kondensate aus den Alkaliatomen Rubidium, Natrium und Lithium erzeugten, schlug Kleppner sich noch immer mit dem Atom seiner Wahl herum: Wasserstoff. Damit hatte er schon in den späten fünfziger Jahren als Doktorand und Postdoc an der Harvard University begonnen. Dort war er mit Norman Ramsey an der Erfindung des Wasserstoff-Masers beteiligt; dieser Verwandte des Lasers arbeitet im Mikrowellenbereich und dient unter anderem für Hochpräzisionsmessungen, zum Beispiel bei Tests der Einsteinschen Relativitätstheorie. Im Jahre 1996 zog Kleppner von der Harvard University zum MIT, wo er nun geschäftsführender Direktor am Forschungslabor für Elektronik ist.

Auf das Bose-Einstein-Thema ließ Kleppner sich um 1976 ein, als er mit so genanntem spinpolarisiertem Wasserstoff arbeitete. „Ich fand die Idee verrückt“, erinnert sich Kleppner, aber ein junger Professor namens Thomas Greytak stimmte ihn um. Seitdem arbeiten die beiden zusammen.

In spinpolarisiertem Wasserstoff sind die Spins aller Atome gleich ausgerichtet; den Spin kann man sich als winzige magnetische Kompassnadel vorstellen, die jedes Atom mit sich führt. Ein derartiges Gas ist so reaktionsträge wie Helium, da zwei Wasserstoffatome exakt entgegengesetzte Spins haben müssen, um ein Molekül zu bilden. Als einziges von allen Elementen sollte diese Form von Wasserstoff bis hinab zum absoluten Nullpunkt gasförmig bleiben.

Hoffnungsvoll versuchten Kleppner und Greytak am MIT sowie Konkurrenten an der Universität Amsterdam gegen Ende der siebziger Jahre, ein Bose-Einstein-Kondensat in spinpolarisiertem Wasserstoff zu erzeugen; sie ließen sich nicht träumen, wie lange die Suche dauern würde und dass ausgerechnet Kondensate aus metallischen Atomen ihnen die Show stehlen sollten.

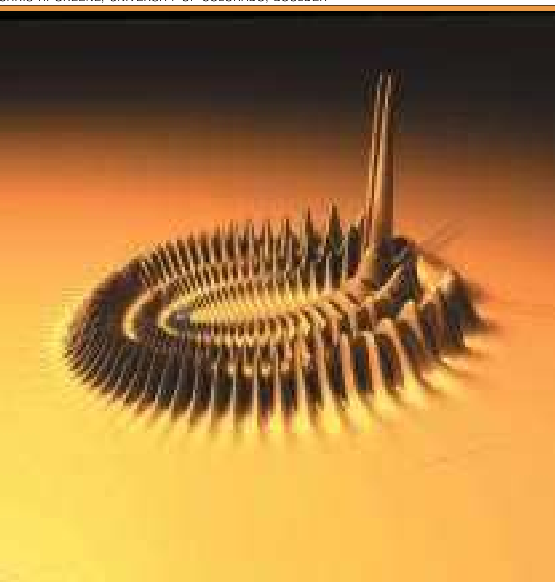
Auch wenn Kleppners Gruppe nicht als erste durchs Ziel lief, gelangen ihr doch mehrere ganz entscheidende Fortschritte, so 1987 der Nachweis des Verdampfungskühlens an spinpolarisiertem Wasserstoff – eine Meisterleistung, die die Alkaliatom-Gruppen erst sieben Jahre später wiederholen konnten. Bis 1991 war die Kleppner-Greytak-Gruppe bis auf einen Faktor drei an die zur Kondensation erforderliche Temperatur und Dichte herangekommen, während die Alkaliatome damals um den Faktor eine Million zurücklagen. Leider standen an diesem Punkt einige vertrackte Eigenschaften von Wasserstoff im Weg; unter anderem erwies es sich als schwierig, zum Nachweis eines Kondensats wichtige Eigenschaften des Gases zu messen. Bei den Alkaliatom-Gasen können dafür sichtbares Licht und normale Lasertechnik eingesetzt werden; doch das entsprechende Licht für Wasserstoff ist ultraviolett und erfordert viel umständlichere Methoden.

Im Juni 1998 riefen zwei von Kleppners Studenten ihn spät abends an: Er solle rasch ins Labor kommen. Endlich war ein Bose-Einstein-Kondensat in Wasserstoff beobachtet worden. Einen Monat später gab Kleppner auf einer Konferenz im italienischen Varenna den Erfolg seiner Gruppe bekannt. Die anwesenden Experten – Kollegen, Konkurrenten und frühere Studenten – feierten den stolzen Wegbereiter mit stehenden Ovationen.

Materiewellen-Verstärkung bedeutet keineswegs, dass der Verstärkungsvorgang aus Energie Materie erzeugt. Vielmehr wird in einem Bose-Einstein-Kondensat ein kleiner Atomlaser-Puls erzeugt, und dieser Puls wird verstärkt, wenn zusätzliche Kondensat-Atome ihrer Bose-Natur gehorchen und sich hinzugesellen. Die gleichzeitige Streuung von Licht aus einem gepumpten Laserstrahl garantiert, dass Impuls und Energie erhalten bleiben.

Dass Materiewellen-Verstärkung auf diese Weise möglich ist, erkannte die MIT-Gruppe Anfang 1999, als sie auf eines ihrer zigarrenförmigen Kondensate einen polarisierten Laserstrahl richtete; zur Überraschung der Forscher traten Atomhäufchen unter 45 Grad aus, und aus beiden Enden der „Zigarre" fielen Lichtstrahlen. Dabei handelte es sich um Streuprozesse mit einem gewissen Verstärkungseffekt; insofern glichen sie der so genannten Superradianz, einer Form von lawinenartiger Strahlungsverstärkung.

CHRIS H. GREENE, UNIVERSITY OF COLORADO, BOULDER



Durch geeignete Laseranregung könnte in einem Rubidium-Kondensat ein künstliches Molekül erzeugt werden, das tausendmal größer wäre als das natürliche zweiatomige Rubidium-Molekül. Die goldfarbenen Kurven der Computergrafik zeigen die Dichte der Elektronenwolke, welche die Bindung bewirkt. Die blaue Kugel ist eines der Atome; das andere ist durch die „Zwillingstürme" verdeckt. Zwar haben mehrere Forscher durch Laseranregung in Kondensaten gewöhnlichere ultrakalte Moleküle erzeugt; doch bislang ist ihnen noch kein Kondensat aus Molekülen gelungen.

Nichtlineare Optik und gebremstes Licht

Bei diesen Prozessen verhalten die Kondensate sich ganz ähnlich wie Licht – im Gegensatz zu ihrem Verhalten als Superflüssigkeit. Ein besonders lebhaftes Forschungsgebiet war im vergangenen Jahrzehnt die nichtlineare Optik, bei der Licht mit sich selbst in Wechselwirkung tritt. Forscher an den amerikanischen Bell Laboratories haben zum Beispiel mit nichtlinearen Lichtpulsen, so genannten Solitonen, riesige Datenpakete durch Glasfasern geschickt.

Normalerweise zeigt Licht kaum Wechselwirkung mit sich selbst; daher sind extrem hohe Lichtintensitäten oder spezielle Medien nötig, um nichtlineare Effekte zu erzielen. Da die schwachen Wechselwirkungen der Atome in Kondensaten automatisch nichtlineare Effekte bewirken, sind die Bose-Einstein-Gebilde zur Untersuchung derartiger Prozesse ideal geeignet. Die klassische Vorstellung von Atomen als Teilchen, die wie winzige Murmeln zusammenstoßen, versagt völlig bei der Interpretation dieser Experimente.

Eine Bravourleistung der nichtlinearen Optik ist das enorme Verlangsamen von Licht. Im Vakuum breiten sich elektromagnetische Wellen – ob Radio-, Röntgen- und Lichtstrahlen – mit absoluter Höchstgeschwindigkeit aus: 300000 Kilometer pro Sekunde. In einem Medium pflanzt Licht sich langsamer fort: in Wasser mit ungefähr drei Viertel und in normalem Glas mit zwei Drittel der Vakuumlichtgeschwindigkeit.

Im Jahre 1999 bremste Lene Vestergard Hau vom Rowlands Institute for Science in Cambridge (Massachusetts) einen Lichtstrahl durch ein ultrakaltes und optisch modifiziertes Gas auf 17 Meter pro Sekunde ab – das Tempo eines schnellen Fahrrads. Im November 2000 berichtete Ketterles Gruppe, ein Lichtstrahl habe ein Kondensat mit einem Meter pro Sekunde, also buchstäblich im Schritttempo, durchquert. An sich ist kein Kondensat erforderlich, um solche Effekte zu erzielen, aber die enorme Kälte der kondensierten Gase schafft ideale Bedingungen dafür.

Ulf Leonhardt und Paul Piwnicki vom Königlichen Institut für Technologie in Stockholm spekulierten 1999, dass verlangsamtes Licht, das einen Wirbel in einem Kondensat streift, als Miniaturmodell für Prozesse in der Umgebung von rotierenden Schwarzen Löchern dienen könnte. Beispielsweise könnte das Licht in den Wirbelkern hineingezogen werden – insbesondere dann, wenn der Strahl sich gegen den Rotationsfluss bewegt.

In noch nicht veröffentlichten Arbeiten zeigen Peter Zoller und Ignacio Cirac von der Universität Innsbruck, dass es mit bereits heute verfügbarer Technik möglich sein sollte, Schallmodelle von Schwarzen Löchern zu bauen – das heißt solche, bei denen Schallwellen die Rolle des Lichts übernehmen. Ihren Berechnungen zufolge explodieren solche Gebilde und stoßen dabei Scharen von Schallquanten, so genannten Phononen, aus. Diese Explosionen würden das Verdampfen mikroskopisch kleiner Schwarzer Löchern simulieren, bei dem infolge von Quanteneffekten ein thermisches Teilchengemisch austritt, die so genannte Hawking-Strahlung.

In einem Artikel vom August 2000 mutmaßen Wayne Hu und seine Mitarbeiter von der Princeton University, dass die unsichtbare dunkle Materie, die offenbar rund neunzig Prozent der Masse im Universum ausmacht, in Form eines Bose-Einstein-Kondensats aus Teilchen äußerst geringer Masse existieren könnte. Falls diese kühne Hypothese zutrifft, wären die kältesten Gase im Universum zugleich die häufigsten. ■

Graham P. Collins *ist Redakteur bei Scientific American.*

Literaturhinweise

Experimental Studies of Bose-Einstein Condensation. Von Wolfgang Ketterle in: Physics Today, Bd. 52, S. 30, Dezember 1999.

Bose Condensates Make Quantum Leaps and Bounds. Von Yvan Castin et al. in: Physics World, Bd. 12, S. 37, August 1999.

Atom Lasers. Von Kristian Helmerson et al. in: Physics World, Bd. 12, S. 31–36, August 1999.

The Yin and Yang of Hydrogen. Von Daniel Klepper in: Physics Today, Bd. 52, S. 11, April 1999.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie auch unter ***www.spektrum.de/aktuellesheft.html***

Computer-



Moderne Algorithmen der Computergrafik ermöglichen die Herstellung realistisch wirkender Naturszenen. Damit eröffnen sich neue Anwendungen in der Visualisierung ökologischer Daten sowie eine neue Qualität virtueller Welten in Simulatoren und auch Computerspielen.

VON OLIVER DEUSSEN UND BERND LINTERMANN

Przemyslaw Prusinkiewicz, Computergrafiker an der Universität von Calgary (Kanada), sah sich einem ungewöhnlichen Fälschungsvorwurf ausgesetzt. Seine Kollegen argwöhnten nicht etwa, er wolle etwas Nachgemachtes für echt ausgeben, sondern umgekehrt etwas Echtes für nachgemacht.

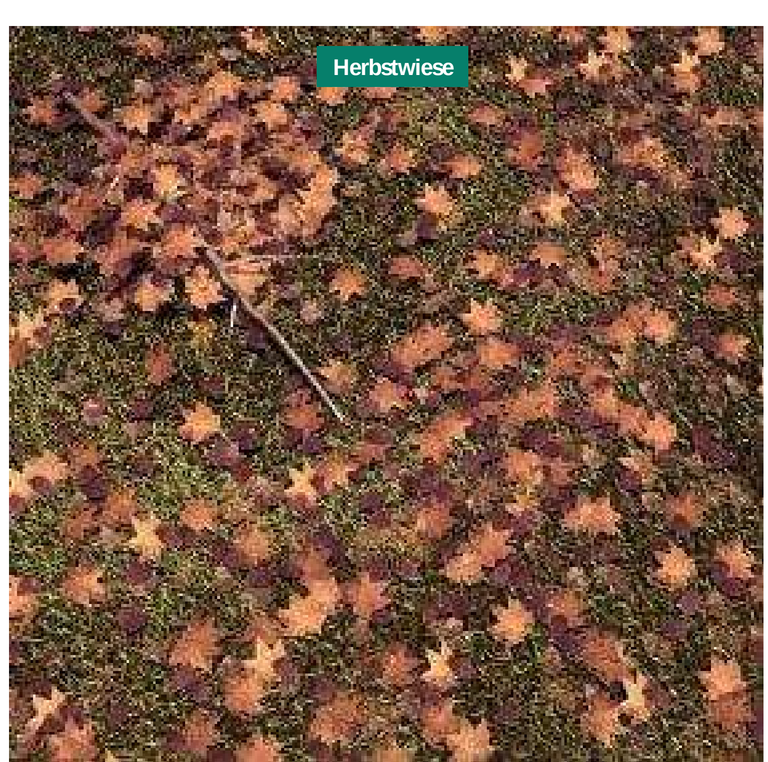
Jedes Jahr trifft sich der Unterausschuss für Computergrafik (*special interest group on graphics*, Siggraph) der amerikanischen Informatikervereinigung ACM zu einer Art Leistungsschau. Auf einem dieser Treffen Anfang der neunziger Jahre legte Prusinkiewicz ein Bild von einem Sonnenblumenfeld vor, das so echt aussah, dass selbst Fachkollegen es nicht für computererzeugt halten mochten.

Hinter dieser Misstrauen erregend guten Darstellungsleistung steckt ein ganzes Bündel von Ideen und Verfahren, die seit Prusinkiewicz' ersten Pionierarbeiten noch beträchtlich weiterentwickelt wurden. Über sie soll in diesem Artikel berichtet werden.

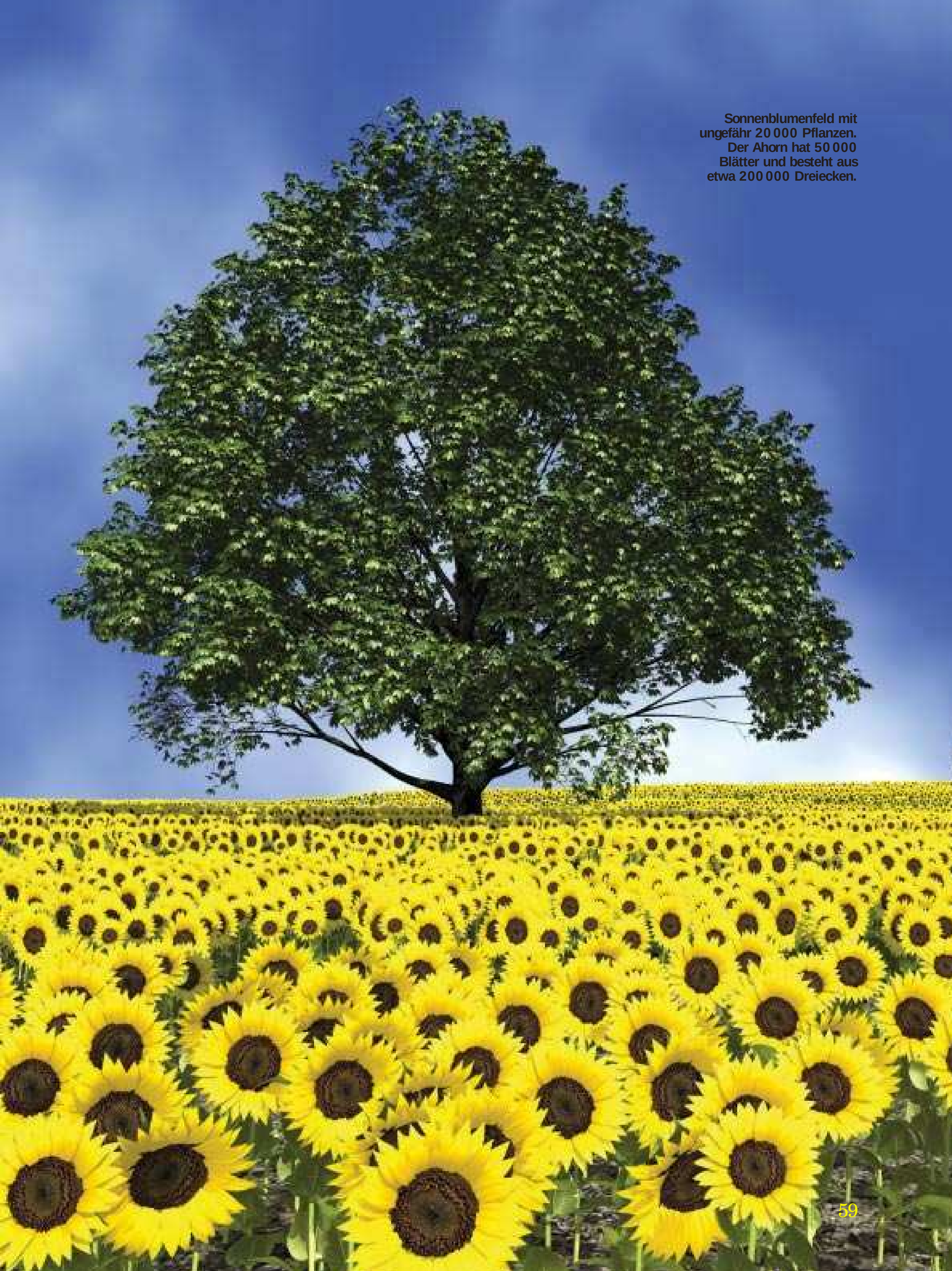
Ein wichtiger Grundgedanke ist: Der Computer erzeugt nicht nur ein Bild von einer Pflanze oder einer ganzen Landschaft. Er erzeugt intern eine dreidimensionale geometrische Repräsentation und erst in einem zweiten Schritt aus dieser Repräsentation ein Bild. Durch Änderung des Betrachterstandpunkts ergeben sich aus derselben internen Darstellung immer wieder neue Bilder. Der Benutzer kann also in der imaginären Landschaft, die sich ihm am Computerbildschirm präsentiert, umherwandern. ▶



Sommerwiese mit sieben verschiedenen Pflanzenarten



Herbstwiese



Sonnenblumenfeld mit ungefähr 20 000 Pflanzen. Der Ahorn hat 50 000 Blätter und besteht aus etwa 200 000 Dreiecken.



Kreuzkraut
(Senecio doronicum)



Benjamin
(Ficus benjamini)



junger Trompetenbaum
(Catalpa bignonioides)



Mondviole
(Lunaria rediviva)



Rosskastanie
(Aesculus hippocastanum)

Wie aber macht man die interne Darstellung einer Pflanze? Eine nahe liegende Idee ist, dass die virtuelle Pflanze so heranwachsen soll wie die echte. Aus einem kleinen Wachstumskegel sprießen eine Blattanlage und ein neuer Wachstumskegel; die Blattanlage wächst zu einem Blatt aus, das sich seinerseits in Stiel und Blattspreite differenziert. Dieses Prinzip hat der Biologe Aristid Lindenmayer 1968 in den so genannten L-Systemen formalisiert (Spektrum der Wissenschaft 9/1989, S. 52). Eigentlich wollte er in erster Linie das Zellwachstum modellieren; die L-Systeme wurden aber bald auch für Pflanzen verwendet.

Ein Buchstabe steht beispielsweise für eine Knospe. Zu diesem Buchstaben gibt es einerseits eine Anweisung, wie diese Knospe zu zeichnen ist, und aus dem Kontext ergibt sich, wohin; andererseits gibt es eine Ersetzungsregel, die beispielsweise aus „Knospe" so etwas wie „Blattanlage plus Knospe" macht (Kasten unten). Oder aus einem Zweig wird ein Zweig mit zwei angesetzten kleineren Zweigen; diese verzweigen

Lindenmayer-Systeme und Ersetzungsregeln

Sprunghaftes Wachstum einer Computerpflanze

Man stelle sich eine Art künstliches Krabbeltier vor, das sich im dreidimensionalen Raum in diskreten Schritten bewegen kann. Zu jedem Zeitpunkt hat es eine Position und eine Orientierung, das heißt, eine bestimmte Lage im Raum, sodass man von vorne, hinten, links, rechts, oben und unten in Bezug auf die gegenwärtige Lage des Krabbeltiers sprechen kann. Wenn es sich bewegt, dann nach vorn; es kann auch zuvor seine Orientierung verändern. (Es handelt sich um eine dreidimensionale Version der „Schildkröten", mit denen Seymour Papert eine diskrete Geometrie der Ebene definierte.) Man kann das Krabbeltier durch Signale fernsteuern, die nur aus jeweils einem Zeichen bestehen:

- `F` wandere eine gewisse Strecke *d* in der aktuellen Orientierung, zeichne eine Linie
- `f` wie `F`, aber ohne eine Linie zu zeichnen
- `+ –` wende dich um einen gewissen Winkel α nach rechts bzw. links gegenüber der Laufrichtung
- `& ^` kippe um den Winkel α nach oben bzw. unten
- `\ /` rotiere die eigene Körperachse um den Winkel α nach rechts bzw. links
- `|` „mach auf dem Absatz kehrt": ersetze die bisherige Orientierung durch ihr Negatives
- `[` merke dir den gegenwärtigen grafischen Zustand (Position, Richtung, Malfarbe und so weiter)
- `]` kehre zum zuletzt gemerkten grafischen Zustand zurück
- `{ }` fasse den Weg, den der Zeiger zwischen den geschweiften Klammern zurücklegt, als Rand einer Fläche auf und fülle diese Fläche aus
- `! '` Diese Zeichen ändern die Dicke und die Farbe der im Folgenden zu zeichnenden Linien.

Zu diesen „elementaren Zeichen" werden nun weitere definiert. Man hat die Freiheit, sich unter diesen Zeichen konkrete Dinge (in unserem Fall Pflanzenteile) vorzustellen: A wie Abzweigung, B wie Blatt, S wie Stiel. Maßgeblich ist jedoch nur eine Regel, die ein neu zu definierendes Zeichen durch eine Folge von (elementaren und neuen) Zeichen ersetzt. Ein System solcher Regeln könnte zum Beispiel wie folgt aussehen:

```
(1)  A → [&FB!A]////'[&FB!A]///////'[&FB!A]
(2)  F → S////F
(3)  S → FB
(4)  B → [''''^^{-f+f+f-|-f+f+f }]
```

Aus einer gegebenen Zeichenfolge wird in einem Lindenmayer-System eine neue, indem für jedes Zeichen der Folge seine „Bedeutung", sprich die es definierende Zeichenfolge, eingesetzt wird. So entstehen aus der „Ur-Zeichenfolge", die nur aus dem Buchstaben A besteht, nacheinander die Folgen

```
[&FB!A]////'[&FB!A]///////'[&FB!A]
```

```
[&S////F['''^^{-f+f+f-|-f+f+f}]![&FB!A]///
/'[&FB!A]///////'[&FB!A]]////'[&S////F[
'''^^{-f+f+f-|-f+f+f}]![&FB!A]////'[&FB!
A]///////'[&FB!A]]///////'[&S////F['''^^{-
f+f+f-|-f+f+f}]![&FB!A]////'[&FB!A]//////
'[&FB!A]]
```

Nach einer vorher festgelegten Anzahl von Ersetzungsschritten wird das Ergebnis gezeichnet, das heißt das gedachte Krabbeltier folgt den Bewegungs- und Zeichenanweisungen der so entstandenen Zeichenfolge (und ignoriert die neu definierten Zeichen).



Das Ergebnis mehrfacher Anwendung der Ersetzungsregeln: ein kleiner Busch



sich wieder durch Anwendung der Ersetzungsregel, bis schließlich die Zweige fünfter Ordnung Blätter ansetzen.

Indem man auf einen gewissen Buchstaben (eine „Keimzelle“) die Ersetzungsregel anwendet, auf die dadurch entstehende Zeichenkette wiederum alle Ersetzungsregeln und so weiter, gewinnt man immer länger werdende Zeichenketten. Lässt man schließlich den Computer eine solche Zeichenkette als Folge grafischer Anweisungen interpretieren, gewinnt man ein Bild von einer ausdifferenzierten Pflanze – je länger die Zeichenkette, desto vielgestaltiger.

Auf diese Weise lassen sich allerdings sowohl natürlich wirkende als auch physikalisch unmögliche Bäume erzeugen. Die Menge der statisch stabilen und erst recht die Menge der natürlich vorkommenden Bäume ist ein winziger Teil der insgesamt herstellbaren Verzweigungsstrukturen. Es bleibt also die Frage, wie man die Menge der herstellbaren Bäume einschränkt auf im weitesten Sinne lebensfähige Exemplare, um aus dieser Menge im nächsten Schritt die tatsächlich existierenden zu extrahieren.

Eine Möglichkeit besteht darin, von dem hohen Abstraktionsniveau der L-Systeme abzugehen und den im Computer wachsenden Baum realitätsnäher zu modellieren. Das läuft auf eine klassische Simulation von Wachstumsvorgängen hinaus. Gewisse zahlenmäßige Parameter („Metrikdaten“) wie etwa der typische Winkel einer Verzweigung oder das Ausmaß, in welchem sich ein wachsender Stängel zum Licht hin krümmt, lassen sich an realen Bäumen messen und in die Simulation einbringen.

So gibt es eine Methode zur Erzeugung von Bäumen, bei der das Programm entsprechend den Metrikdaten der Baumart Knospen auf der Oberfläche einer „Urzelle“ verteilt und wachsen lässt. (Natürlich erzeugen wir oder die Computer keine Bäume, sondern nur interne Darstellungen von Bäumen; aber der verkürzende Sprachgebrauch hat sich unter den Computergrafikern eingebürgert.) Ein anderes Verfahren setzt einen Baum algorithmisch aus vielen unsichtbaren Einzelsträngen zusammen, die von der Wurzel bis zu jeweils einem Blatt ▶

Aus dem dreidimensionalen Computermodell eines Baums entsteht eine „Zeichnung“ nach dem Brauch der Landschaftsplaner, indem ausgefüllte Flächen durch Umrisslinien und Blätter durch abstrakte Figuren ersetzt wurden. Diese Zeichnung wurde durch Einfärben noch weiter verfremdet.

Literaturhinweise

Interactive Modeling of Plants. Von Bernd Lintermann und Oliver Deussen in: IEEE Computer Graphics and Applications, Bd. 19, Nr. 1, Januar–Februar 1999, S. 56.

Realistic Modeling and Rendering of Plant Ecosystems. Von Oliver Deussen et al. in: Computer Graphics, Bd. 32, Nr. 4, August 1998, S. 275.

The Algorithmic Beauty of Plants. Von Przemyslaw Prusinkiewicz und Aristid Lindenmayer. Springer, Heidelberg 1990.

Weblinks unter ***www.spektrum.de/aktuellesheft.html***

oder einer Blüte reichen. Der Querschnitt eines Astes oder Stamms ist charakterisiert durch die Anzahl der in ihm verlaufenden Stränge. Auf diese Weise ergeben sich natürliche Proportionen, ein Ansatz, den schon Leonardo da Vinci im 16. Jahrhundert formuliert hat.

Vereinigung von regelbasierten und prozeduralen Prinzipien

Obwohl dieses Verfahren eine Reihe natürlich wirkender Bäume erzeugt, ist es nicht so systematisch, wie man es sich wünschen würde. Die Vermessung realer Bäume liefert zwar eine Vielzahl beschreibender zahlenmäßiger Daten. Diese lassen sich jedoch im Allgemeinen nicht oder nur teilweise in Parameter einer Simulation umsetzen. Auf der anderen Seite bleibt die Abgrenzung unklar, mit welchen Parameterwerten ein Algorithmus natürlich wirkende Bäume liefert und mit welchen nicht. Es bleibt also ein erhebliches Maß an Probieren.

Neuere Ansätze – darunter der unsere – sind bestrebt, aus dieser Not eine Tugend zu machen: Wenn man schon probieren muss, dann mit möglichst unmittelbarer Rückmeldung. Der Benutzer wählt das Bild- und Datenmaterial, aus dem er einen Baum machen will, und die Software führt ihm, dank der hohen Rechenleistung moderner Grafikrechner, auf der Stelle vor Augen, wie die zugehörige Pflanze aussieht. Insbesondere in der Gebrauchsgrafik ist dies von Vorteil, weil hier neben der botanischen Korrektheit weitere Anforderungen an die Modelle gestellt werden. Oftmals werden für Filmsequenzen Bäume ganz bestimmter Form angefordert, oder bewusst irreale Pflanzen für Spezialeffekte.

In unserem Ansatz wird eine Pflanze aus Bausteinen zusammengesetzt, die jeweils Pflanzenteile wie etwa Blätter oder Blüten erzeugen. Der Benutzer verbindet die Bausteine interaktiv zu einem Graphen, der die gesamte Pflanze beschreibt. Das Neuartige an diesem Verfahren ist die Kombination von regelbasierten und prozeduralen Elementen zu einer Modelliermethode. In den einzelnen Komponenten berechnen Algorithmen die geometrischen Details; das Regelsystem wird durch den Graphen beschrieben, kann aber nunmehr einfacher Natur sein, da viele Aspekte der Pflanze durch die geometrischen Algorithmen abgedeckt werden (Kasten Seite 64).

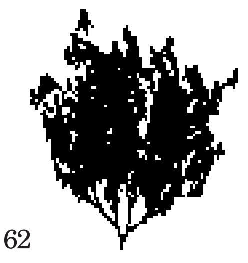
Die von uns praktizierte Zerlegung in algorithmische und regelbasierte Anteile hat einen weiteren Vorteil: Ohne großen Zusatzaufwand kann man – zum Beispiel – vom Wachstum einer Pflanze eine Art Kurzfilm erzeugen. Das Regelsystem bleibt unverändert; nur die Parameter der Algorithmen in den Komponenten ändern sich mit der „Zeit“, in der das fiktive Wachstum stattfindet. Der Benutzer kann sich damit begnügen, die Parameterwerte für einige markante Zeitpunkte zu bestimmen. Der Computer berechnet dann für jedes Filmbild durch Interpolation die gültigen Parameter, aus diesen eine Pflanzengeometrie und aus dieser das fertige Bild (Bild Seite 65).

Eine derart kontinuierliche Veränderung einer Pflanze wäre mit einem L-System nur über umständliche Zusätze zu modellieren, da dort Wachstum nur in diskreten, ziemlich großen Schritten stattfindet.

Hat man auf diese Weise verschiedene Pflanzen erzeugt, möchte man diese zu ganzen Landschaften kombinieren. Aus einer Reihe von Gründen ist es hier aber mit dem einfachen Nebeneinanderstellen der Modelle nicht getan:

➢ **Geometrische Komplexität:** Die Geometrie einer Pflanze wird üblicherweise über Dreiecke im Raum beschrieben. Ein einzelner Baum benötigt bis zu einer Million Dreiecke, ein Quadratmeter Wiese eine ähnliche Anzahl. Für größere Szenen oder gar ganze Landschaften wären daher viele Milliarden Dreiecke notwendig, was selbst moderne Rechner vor große Schwierigkeiten stellen würde. Abhilfe schafft eine gezielte Vergröberung, ein so genannter *Level-of-Detail*-Algorithmus: Je weiter entfernt ein Baum vom Betrachter steht, desto weniger geometrische Details werden zu seiner Beschreibung verwendet. Ein guter Algorithmus verändert die Beschrei-





Flieder
(Syringa vulgaris)



Hopfenklee
(Medicago lupulina)



Barbarakraut
(Barbarea vulgaris)



Einblatt
(Spathiphyllum)



Strahlenaralie
(Schefflera actinophylla)

Alle Elemente dieser Landschaft am Bach sind völlig synthetisch. Einzig auf den Blättern wurden Bilder echter Blätter als Textur aufgebracht. Die von Ort zu Ort unterschiedliche Bodenfeuchte geht als Parameter in die Modelle ein; deswegen wachsen am Ufer des simulierten Baches andere Pflanzen als in größerer Entfernung.

bung der Pflanze so unmerklich, dass dem Betrachter, der sich virtuell auf sie zu bewegt, nichts auffällt.

➢ **Natürliche Variabilität:** Keine zwei Pflanzen gleichen einander völlig. Würde man eine einmal erzeugte Pflanze vielfach in einer Szene wiederholen, würde es dem Betrachter sofort auffallen. Daher muss eine Anzahl verschiedener Repräsentanten für jede Spezies erzeugt werden, die – gedreht und geringfügig vergrößert oder verkleinert – über die Szene verteilt werden. Interessanterweise reichen einige wenige Repräsentanten aus, um einen Eindruck natürlicher Variabilität zu erzeugen. Nur die Daten dieser Exemplare werden gespeichert und eine Liste der Positionen angelegt, an denen sich Kopien eines Exemplars befinden sollen.

➢ **Interaktion zwischen Pflanzen:** Das Aussehen einer Pflanze wird maßgeblich durch ihre Umgebung beeinflusst. Ein ▶



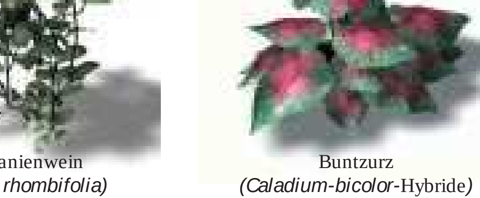
Wunderstrauch
(Codiaeum variegatum)



Regenschirmpflanze
(Eleocharis vivipara)



Kastanienwein
(Cissus rhombifolia)



Buntzurz
*(Caladium-bicolor-*Hybride*)*

Interaktive Modellierung

Ein Baukasten für Pflanzen

Die Vorstellung von zusammensteckbaren Einzelteilen, wie in einem Baukasten für Kinder, kommt der Sache schon recht nahe: Will man einen Zweig mit Blättern modellieren, so nimmt man einen Blatt-Baustein, steckt ihn auf einen zugehörigen Stiel-Baustein und diesen auf einen Zweig-Baustein.

In der Tat kann in unserem Programm der Benutzer Symbole solcher Bausteine auf dem Bildschirm bewegen und zu einem Graphen verknüpfen. Die Bausteine sind jedoch weit mehr als nur passive Klötzchen. Hinter ihnen stecken ganze Unterprogramme; sie erzeugen nicht nur einfach vorgegebene Strukturen, sondern verändern sie in Abhängigkeit von Parametern, die der Benutzer angibt. So kann ein Blatt auf Anweisung des Benutzers in Sekundenbruchteilen breiter, gewölbter oder gezackter werden. Andere Anweisungen machen einen Baum schlanker oder gedrungener oder ändern den Winkel seiner Verzweigungen.

Weitere Bausteine vervielfältigen alles, was in dem Graphen an ihnen hängt, oder wirken global auf alle anderen Bestandteile des Graphen. Da die Algorithmen in den Bausteinen botanische Gesetzmäßigkeiten wiedergeben, stellen sich fast automatisch biologisch korrekte Modelle ein.

Ein kleines Sortiment von Bausteinen genügt, um fast jede Art von Pflanzen zu erzeugen. Unter den elf Typen, die wir momentan verwenden, sind:

Blatt: Komponente zur Konstruktion von Blättern. Der Benutzer kann verschiedene Blattformen einstellen. Zur Steigerung des realistischen Eindrucks wird diese Form mit Bildern echter Blätter überzogen (*texture mapping*, vergleiche Spektrum der Wissenschaft 12/1998, S. 98).



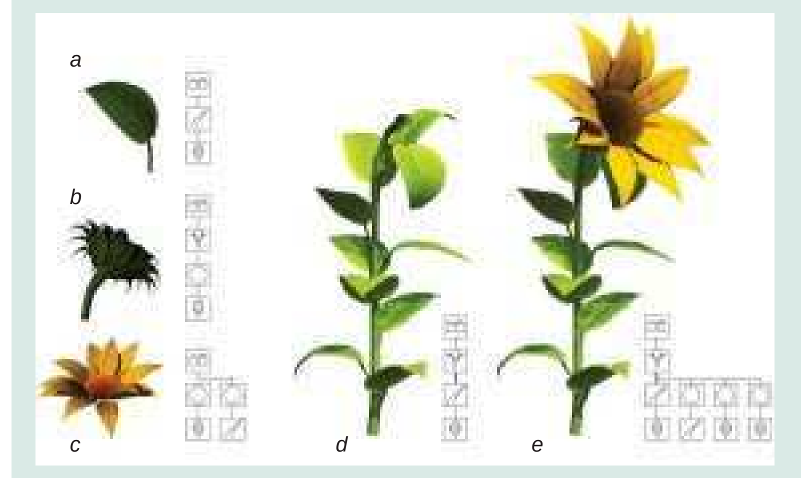
Horn: Erzeugt einen verallgemeinerten Zylinder, der seinerseits aus lauter kleinen Zylinderstücken zusammengesetzt wird (Spektrum der Wissenschaft 6/1997 S. 10). Hörner werden für alle Arten von Blattstielen, Gräsern und Zweigen verwendet.

Baum: Erzeugt einen Baumstamm und vervielfältigt alle an ihm in der Strukturbeschreibung hängenden Komponenten als Verzweigungen. Sind weitere Baumkomponenten angehängt, entsteht das Grundgerüst für einen Baum.

Phiball: Vervielfältigt alle Nachfolgekomponenten und setzt die verschiedenen Exemplare auf eine Kugeloberfläche, und zwar so, wie in echten Pflanzen die Anlagen einzelner Blütenblätter, Schuppen bei einem Tannenzapfen oder Sonnenblumenkerne sich anordnen (Spektrum der Wissenschaft 5/1996, S. 14). Dabei spielt das Verhältnis ϕ (phi) des Goldenen Schnitts eine entscheidende Rolle.

Freiformdeformation: Dieser Baustein verändert die geometrische Gestalt einzelner Teile oder der gesamten Pflanze, die dadurch zum Beispiel um ein Hindernis herumwachsen kann.

Tropismus: Dieser Baustein dient zur Definition von Licht- und Gravitationsfeldern. Viele Pflanzen richten ihre Blätter und Zweige entsprechend diesen Feldern aus (Photo- bzw. Gravitropismus). Zusätzliche Effekte wie etwa der Einfluss von Wind auf die Wuchsform lassen sich als Tropismen modellieren.



Konstruktion einer künstlichen Sonnenblume: Blätter der natürlichen Pflanze werden fotografiert und digitalisiert. Diese Daten werden auf die Geometrie der künstlichen Blätter aufgebracht (*a*). Der Kopf und die Blüte der Blume werden mit den Bausteinen Blatt und Phiball modelliert (*b* und *c*), der Stiel mit den Blättern kombiniert (*d*) und schließlich die ganze Pflanze zusammengesetzt (*e*). Das Kamerasymbol steht für den Baustein, der die ganze an ihm hängende Struktur zu Papier oder Bildschirm bringt.

Baum neben einer Mauer oder innerhalb einer Baumgruppe hat eine andere Form als ein allein stehender Baum. Dies muss schon bei der Herstellung der Einzelpflanzen berücksichtigt werden. Hier finden geometrische Randbedingungen Anwendung, die schon während der Herstellung einer Pflanze deren Gesamtvolumen beschränken.

Sind die geometrischen Daten für eine Szene erzeugt, wird im nächsten Schritt eine gedachte Kamera mit Blickrichtung, Öffnungswinkel und Bildauflösung definiert. Für jedes Pixel des herzustellenden Bildes sind nun Farbe und Helligkeit zu bestimmen. Dies geschieht üblicherweise durch Strahlrückverfolgung (*Raytracing*, Spektrum der Wissenschaft 4/2000, S. 74, und 12/1991, S. 128): Man schickt vom Projektionszentrum der gedachten Kamera durch jedes Pixel der Bildebene einen Strahl in die Szene und bestimmt, welche Objekte er trifft.

Bei mehreren Millionen Strahlen und einigen Milliarden Dreiecken entsteht hierbei ein erheblicher Rechenaufwand.



Eine Schlüsselblume wächst: Momentaufnahmen einer Animation, die automatisch aus wenigen Modellbeschreibungen hergestellt wurde.

Für spiegelnde Oberflächen wie Wasser oder durchscheinende Gegenstände wie dünne Blätter ist der Strahl noch über das erste getroffene Objekt hinaus zu verfolgen, was den Aufwand weiter erhöht. Erstaunlicherweise lassen sich die Algorithmen mit allerlei Tricks aber so effizient gestalten, dass die Erzeugung der Bilder oftmals schneller vonstatten geht als die Herstellung und Verwaltung der geometrischen Daten.

Wandern durch virtuelle Landschaften

Zur Beschreibung einer großen Szene verstreuen wir zunächst gleichsam viele Exemplare einer Pflanze über den gedachten Boden. Die Standorte der einzelnen Pflanzen sowie ihre individuellen Eigenschaften (beschrieben durch geometrische Parameter) hängen sowohl vom Zufall ab als auch von vorgebbaren globalen Größen wie Bodenfeuchtigkeit, Sonneneinstrahlung und Hindernissen in der Landschaft (Bild Seite 62/63). Im nächsten Schritt vereinfachen wir das Sortiment, indem wir – mit einer Variante der Clusteranalyse aus der Statistik – Repräsentanten bestimmen, möglichst wenige Musterexemplare, welche die Vielfalt der soeben erzeugten Pflanzen möglichst gut ausschöpfen. Jede Pflanze wird dann durch das ihr ähnlichste Musterexemplar ersetzt. Diese Instanzenbildung sorgt bei geeigneter Implementierung für eine dramatische Reduzierung der Daten. Für übliche Szenen müssen statt 500 Gigabyte Daten nur noch einige hundert Megabyte verarbeitet werden, was eine Bilderzeugung auch auf PCs möglich macht.

Eine Instanzenbildung kann auch auf Teilen der Einzelpflanzen geschehen. Ein kleiner Ast kann an vielen Stellen innerhalb eines Baumes wiederholt werden, ohne dass es visuell auffällt. Größere Teile eines Baumes können analog in einer Ansammlung von ähnlich aussehenden Bäumen wiederholt werden. Mit der Ausnutzung aller dieser Möglichkeiten lässt sich eine weitere dramatische Datenreduktion erzielen.

Die erzeugten Computergrafiken sind mehr als nur schöne Bilder. Mit ihnen eröffnen sich neue Möglichkeiten beispielsweise in der Visualisierung ökologischer Daten. Oftmals scheitert die Realisierung von Landschaftsplanungen an der mangelnden Transparenz der ausgearbeiteten Pläne. Synthetisch erzeugte Landschaften können in neuer Weise Folgen von Eingriffen in Ökosysteme darstellen, Entscheidungsträger werden in der Lage sein, sich in einer geplanten virtuellen Landschaft umher zu bewegen, Planungsalternativen können visuell abgewogen werden. Mit speziellen Verfahren der Computergrafik kann man die Darstellung auch gezielt so schematisch und nicht-realistisch gestalten, wie das in den Präsentationsskizzen der Landschaftsplaner üblich ist (siehe Bild Seite 61) – mit dem Unterschied, dass der Benutzer durch diese „Skizze“ hindurchwandern kann.

Ein Naturkundemuseum der Zukunft könnte den Besucher in virtuelle Welten entführen, etwa in einen urzeitlichen Wald oder auch in eine einfache Wiese, die aber aus der Ameisenperspektive betrachtet wird. So könnte Natur auf didaktisch neue und auch für junge Menschen attraktive Weise vermittelt werden.

Auch Fahr- und Flugsimulatoren profitieren von realistischen Landschaften. Neben anderen Faktoren ist die Realitätstreue naher Objekte entscheidend für das Bewegungsgefühl des Benutzers. Die Probleme mit der großen Menge an geometrischen Daten lassen sich durch *image-based rendering* vermindern. Unter diesem Begriff vereinigen sich Techniken zur schnellen und Speicherplatz schonenden Berechnung neuer Objektansichten aus vorab berechneten Bildern und Datenstrukturen. Anstelle von Millionen Dreiecken zur Darstellung eines Baumes benötigt man hier nur mehr einige vorab berechnete Bilder mit wenigen Zusatzdaten.

Eine Reihe von vollständig synthetisch erzeugten Kinofilmen demonstrierte in den letzten Jahren die Möglichkeiten moderner Computergrafik. In vielen weiteren Filmen findet Computergrafik auch in einzelnen Szenen ihren Einsatz, ohne dass der Zuschauer etwas davon bemerkt. Hier wie auch bei der Herstellung von Computerspielen liegt weiteres großes Potenzial für den Einsatz synthetischer Pflanzen und Landschaften. ■





***Oliver Deussen** ist Professor für Computergrafik und Mediendesign an der Technischen Universität Dresden. Er promovierte 1996 an der Universität Karlsruhe im Fach Informatik. Neben Computerdarstellungen von Pflanzen arbeitet er an computergenerierten Liniengrafiken und Methoden zur Erzeugung synthetischer Hologramme. **Bernd Lintermann** arbeitet als Informatiker und Medienkünstler am Zentrum für Kunst und Medientechnologie (ZKM) in Karlsruhe. Neben Pflanzen interessiert er sich für genetische Algorithmen, Computermusik und deren Umsetzung in Medienkunstwerken. Beide Autoren setzen seit 1997 ihre Forschungsergebnisse zu Pflanzendarstellungen in einer gemeinsamen Firma um.*

Der Ursprung der modernen Küche

Süßspeisen werden nach dem Hauptgericht serviert – warum eigentlich? Die Antwort liegt in revolutionären medizinischen Konzepten des 17. Jahrhunderts, die von der damals aufkommenden Chemie geprägt waren. Obwohl vorwissenschaftlich, bestimmen sie unsere Essgewohnheiten bis heute.

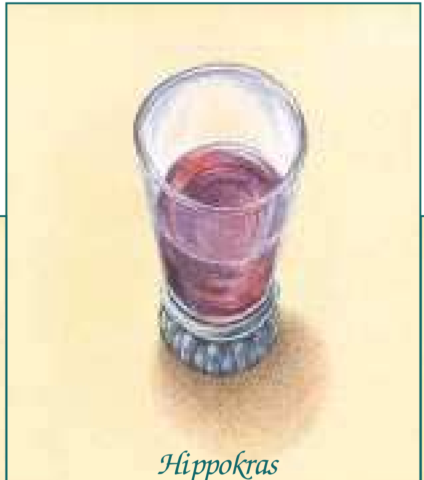
VON RACHEL LAUDAN

Könnten wir uns per Zeitreise an ein Hofbankett im Frankreich oder England des 16. Jahrhunderts versetzen, kämen uns, die wir die traditionelle westliche Küche gewohnt sind, die Speisen recht seltsam vor. Da würde zum Beispiel sehr wahrscheinlich der Blancmanger aufgetischt: ein dicker Brei aus Reis, Hühnerfleisch und Mandelmilch, der mit Zucker bestreut und mit gebratenem Schweinespeck garniert ist. Zum Spanferkel gäbe es vermutlich Kamelinsoße: Saft von sauren, unreifen Trauben, mit Brotkrumen, zerkleinerten Rosinen und zerstoßenen Mandeln angedickt und mit Zimt und Nelken gewürzt. Vielleicht würden auch in Fleischbrühe gekochte Saubohnen mit gehackter Minze serviert – oder Quittenpaste: ein Naschwerk aus Quitten und Zucker oder Honig. Hinunterspülen müssten wir all das wahrscheinlich mit Hippokras, einem mit gemahlenem Ingwer, Zimt, Nelken und Zucker stark gewürzten, angewärmten Wein.

Nur hundert Jahre später kämen uns die Speisen an einer fürstlichen Tafel dagegen ausgesprochen vertraut vor. Ein Hauptgericht könnte etwa aus Rinderbouillon, Austern, Sardellen und gebratenem Truthahn mit Soße bestehen. An Beilagen würden vielleicht Pilze in Sahne-Petersiliensoße, mit Essig und Öl angemachter grüner Salat, frische Birnen und Zitronensorbet gereicht, und in den Gläsern würde Schaumwein perlen.

Bis etwa 1650 ernährte sich die Oberschicht der islamischen und christlichen Welt von Delhi bis London überall weitgehend gleich: Es gab dicke Pürees mit reichlich Gewürzen, süße oder säuerliche Soßen, gekochtes Gemüse und warmen Wein. Alle Hauptgerichte enthielten Zucker. Mitte des 17. Jahrhunderts jedoch änderten sich in Mitteleuropa Auswahl und Zusammensetzung der Speisen radikal. Die Gewürze verloren an Bedeutung; als Soßengrundlage dienten nun Fette oder Öle, während man Obst und Gemüse auch roh verzehrte. Mit Zucker Gesüßtes erschien erst zum Abschluss der Mahlzeit.

Wie kam es zu diesem abrupten Wandel? Wirtschaftliche Gründe kann er schwerlich gehabt haben, denn für die Reichen spielte Geld keine Rolle, und die Armen konnten sich weder die einen noch die anderen Speisen leisten – sie lebten bis weit ins 19. Jahrhundert hinein von Gemüse- und Mehlsuppen mit Brot oder Hafergrütze. Auch mit dem Aufkommen neuer Lebensmittel ist der kulinarische Bruch nicht zu erklären; denn bis auf den Truthahn, eine Neuerung aus Amerika, kamen auch bei unserem zweiten Festessen nur altbekannte Zutaten auf den Tisch. Was sich geändert hat, ist allein die Zubereitung.







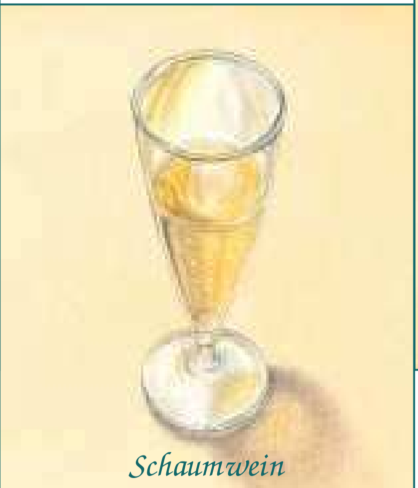
HEIDI NOLAND

Ein typisches Festessen des 16. Jahrhunderts enthielt Blancmanger, ein Mus aus Huhn und Reis, als Hauptgericht. Beilage war etwa Kamelinsoße aus zerstoßenen Mandeln, Brotkrumen und Gewürzen, angerührt mit saurem Traubensaft. Dazu trank man Hippokras (warmen Würzwein).

Diese Speisen des 17. Jahrhunderts sehen für uns Heutige bereits ziemlich vertraut aus: gebratener Truthahn, mit Essig und Öl angemachter grüner Salat sowie Schaumwein als Getränk.



Salat, angemacht mit Essig und Öl



Schaumwein



gebratener Truthahn

HEIDI NOLAND

Tatsächlich sind die Hintergründe der Revolution in der Esskultur vom 16. auf das 17. Jahrhundert in neuen Vorstellungen von schmackhafter Küche und richtiger Ernährung zu suchen. Letztlich spiegeln sie die Geschichte der Chemie und der Medizin wider; denn in jener Zeit wurden die antiken Vorstellungen von der Funktion des Körpers und der Verdauung durch neue Ideen einer chemisch begründeten Medizin ersetzt. Aus heutiger Sicht waren sie nicht weniger obskur; dennoch beruht unsere Esskultur ironischerweise immer noch auf diesen überholten, alchimistisch geprägten Ansichten.

Eine gesunde Ernährung war auch für unsere Vorfahren wichtig – womöglich noch mehr als für uns. Da es im Falle einer Erkrankung kaum wirksame Behandlungsmöglichkeiten gab, hatte die Gesundheitsvorsorge einen immens hohen Stellenwert, und sie fand zu einem großen Teil in der Küche statt. Um nicht zu den unangenehmen Maßnahmen des Purgierens oder Aderlassens greifen zu müssen, pflegten die Leibärzte hochgestellter Personen das Befinden ihrer Schutzbefohlenen rund um die Uhr sorgfältig zu überwachen: Wie war der Gemütszustand? Wie stand es um Schlaf, Bewegung und frische Luft? Das Hauptaugenmerk jedoch galt dem Essen und Trinken. Jeder Hof hielt sich eine Schar von Doktoren, die sich in Fragen der Verdauung auskannten, den Nährwert der Speisen und die Zusammensetzung einer gesunden Mahlzeit zu beurteilen wussten und in erster Linie damit beschäftigt waren, Ernährungsvorschriften für ihre Herrschaft auszuarbeiten.

Das Umsetzen abstrakter Ernährungstheorien in Speisenfolgen, die der gehobenen Tafel angemessen waren, oblag dem Haushofmeister („Majordomus"). Im „Brevier der Gesundheit" von Andrew Boorde, einem bekannten medizinischen Text aus dem Jahre 1547, heißt es: „Ein guter Koch ist ein halber Arzt." Im 16. Jahrhundert richteten sich sowohl der Fürst als auch sein Arzt und Koch nach einer Diätetik, die auf die klassische Antike zurückging. Die wichtigsten Leitsätze waren um das Jahr 400 vor Christus im „Corpus Hippocraticum" erstmals formuliert und Anfang des 2. nachchristlichen Jahrhunderts durch den griechisch-römischen Arzt Galen (Claudius Galenus) in ein System gebracht worden.

Vom Garen und dem Gleichgewicht der Körpersäfte

Wie viele wissenschaftliche Theorien der Antike wurden auch diese Vorstellungen nach dem Untergang der klassischen Zivilisation bereitwillig von islamischen Gelehrten übernommen und fanden Eingang in das arabische Schrifttum.

Seit dem 12. Jahrhundert lagen die wichtigsten arabischen Texte in lateinischen Übersetzungen vor; auf sie beriefen sich die Lehrer an den großen medizinischen Hochschulen Europas, zum Beispiel im südfranzösischen Montpellier. Ende des 15. Jahrhunderts begann man, neu entdeckte griechische Manuskripte zu studieren und bereits bekannte lateinische oder arabische Texte aus der griechischen Originalsprache zu übersetzen. All diese Schriften bildeten die Grundlage vieler populärer Handbücher und Merkverse. Besonders beliebt waren etwa die zahlreichen volkstümlichen Abwandlungen des lateinischen Lehrgedichtes „Regimen Sanitatis Salernitanum" („Gesundheitsleitfaden von Salerno"), das im 11. Jahrhundert entstanden sein muss, aber noch im 16. und 17. Jahrhundert weit verbreitet war. Hier ein Auszug:

Milch, Mark, frischer Käs und Nieren,
Süßwein, Weiz(en), Schweinefleisch und Hirn
Lustspeis, lauter Eier und Feigen
Weinbeer will ich nicht verschweigen,
Machen feist und futtern wohl,
Iss du ihr viel, dein Haus wird voll.

Die Ideen zur rechten Kost, die sich in diesen medizinischen Leitfäden niederschlagen, fußten auf zwei Annahmen. Erstens wurde das Verdauen der Nahrung als eine Art Garvorgang betrachtet, wie überhaupt das Garen oder Kochen als Sinnbild aller Lebensprozesse galt. Samen garten unter der Einwirkung der Sonnenwärme zu Pflanzen, in denen in der Sommerhitze wiederum reife Früchte und Körner garten. Diese konnte der Mensch ernten und sie weiter zu essbaren Speisen garen. Die Hitze des Körpers schließlich garte die Nahrung zu Blut. Alles Unverdauliche wurde dabei in Form von Fäkalien ausgeschieden und trat zusammen mit verwesenden Tieren und Pflanzen erneut in den Kreislauf des Lebendigen ein.

Die zweite Grundlage der mittelalterlichen Ernährungs- und Gesundheitstheorie war die antike Elementen- und Säftelehre. Ärzte wie Küchenchefs waren der Ansicht, dass vier Flüssigkeiten im Körper zirkulierten – Blut, Schleim und gelbe sowie schwarze Galle –, deren Gleichgewicht durch eine entsprechend ausgewogene Nahrung aufrechterhalten werden musste. Diese „Kardinalsäfte" entsprachen über ihre „Urqualitäten" den vier Elementen Luft, Wasser, Feuer und Erde: Blut – heiß und feucht – ordnete ▶

Im kosmischen Nahrungszyklus vor 1650
galt Garen als zentraler Lebensvorgang

Der Kreislauf beginnt mit den Samen im Boden

Sonnenwärme gart die Samen zu Pflanzen

Die Sonne lässt rohe Nahrungsmittel in den Pflanzen reifen

Köche garen die Speisen in der Küche

Der Magen gart die Nahrung weiter

Die Leber gart die Nahrung schließlich zu Lebenssäften; der Körper scheidet Abfallstoffe aus, die wieder zu Boden werden

PATRICIA J. WYNNE

man der Luft zu, Schleim – kalt und feucht – dem Wasser, die gelbe Galle – heiß und trocken – dem Feuer und die schwarze Galle – kalt und trocken – schließlich der Erde.

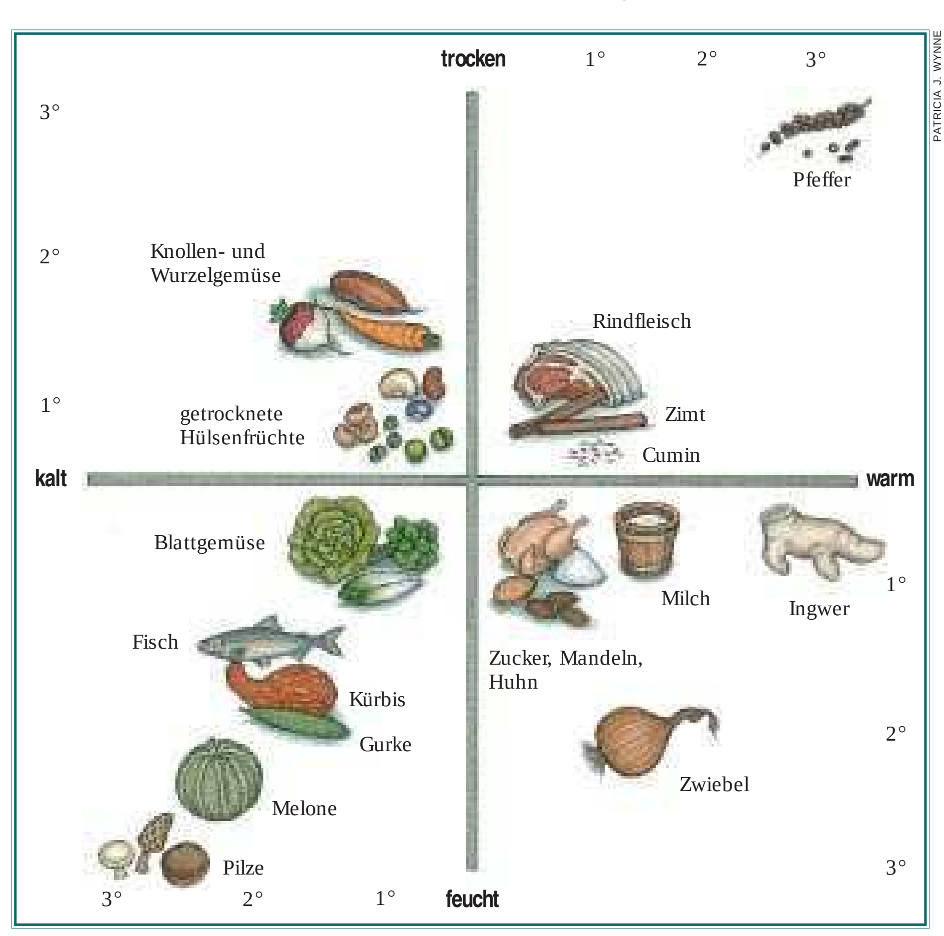
Der menschliche Körper war im Idealfall leicht warm und leicht feucht, aber das Säfteverhältnis wurde auch von Faktoren wie Alter, Geschlecht und Aufenthaltsort beeinflusst: Ältere Menschen hielt man für kälter und trockener als jüngere, menstruierende Frauen für kälter und feuchter als Männer und das Blut der Südeuropäer für heißer als das ihrer nördlichen Nachbarn. Diesen Vorstellungen entsprechend waren auch die Mahlzeiten zu gestalten, nämlich ihrer Zusammensetzung nach idealerweise etwas warm und etwas feucht; nach der einen oder anderen Richtung abweichende Kombinationen konnten als milde Diätmaßnahmen eingesetzt werden, um zum Beispiel alte Menschen zu erwärmen und zu befeuchten, dem feuchteren Geschlecht Nässe zu entziehen oder den Südländer gelassener und den Nordländer lebhafter zu machen.

Die Mahlzeiten auf das Temperament und die jeweilige Verfassung des Essers abzustimmen war Aufgabe des Haushofmeisters. Der hielt sich dabei an die wohlbekannten Eigenschaften einer jeglichen Zutat: Pfeffer zum Beispiel galt als heiß und trocken im dritten Grade, Essig als kalt und feucht im zweiten Grade. Rüben und andere Wurzelgemüse waren – weil angeblich von Natur aus erdig, also trocken und kalt – nur etwas für Bauern. Wollte sie ein Koch dennoch verwenden, musste er sie unbedingt schmoren, um ihnen so Wärme und Feuchtigkeit zuzuführen.

Manche Nahrungsmittel waren nach diesem Schema völlig ungeeignet zum Verzehr. So warnte Guy Patin, Arzt an der Universität Paris und Verfasser des „Traktat über die Erhaltung der Gesundheit“ von 1632, vor Pilzen; sie seien so kalt und nass, dass ihr Genuss nur schade. Nicht viel besser kamen Melonen und andere frische Früchte weg; denn auch sie galten als sehr feucht und zum Verwesen neigend.

Insgesamt war die Zubereitungsart also von großer Bedeutung. Sie sollte einseitige Eigenschaften der Zutaten aus-

Dieses Klassifikationsschema aus dem 16. Jahrhundert
ordnet den einzelnen Nahrungsmitteln einen bestimmten Grad
an Hitze, Kälte, Feuchte und Trockenheit zu.



gleichen und dadurch für das richtige Gleichgewicht in der Nahrung sorgen. So wurden „trockene“ Nahrungsmittel gekocht, „nasse“ wie Mangold, Markkürbisse und besonders Zwiebeln dagegen gebraten oder geröstet. Außerdem erfüllte die Zubereitung den Zweck, die Speisen teilweise vorzuverdauen, sodass sie leichter vom Körper aufgenommen werden konnten.

Nach diesen medizinischen Theorien war der Blancmanger des 16. Jahrhunderts fast ideal: Er vereinigte gleich drei mäßig feuchte und warme Zutaten (Huhn, Reis, Mandelmilch) mit dem gleichfalls feucht-warmen Zucker als Krönung. Das an sich zu feuchte Spanferkel wurde durch Rösten getrocknet; in der Kamelinsoße hielten die warmen Rosinen und der heiße, trockene Pfeffer dem kühl-feuchten Traubensaft die Waage. Sorgsam vermied es der kluge Koch, die gefährlich kalt-feuchten Quitten und Trauben roh auf den Tisch zu bringen; sie wurden deshalb entweder als Dörrobst oder gekocht und gezuckert als Quittenpaste serviert.

Als ideales Getränk zum Essen betrachteten die Gesundheitsexperten den Wein, sofern er nicht im Übermaß genossen wurde. So preist das um 1310 verfasste und 1478 gedruckte „Buch von den Weinen“, das allgemein Arnald von Villanova, dem damals führenden Autor medizinischer Fachbücher und Leibarzt Jakobs II. von Aragon, zugeschrieben wird, den vergorenen Saft der Trauben in höchsten Tönen. Er sei gut gegen Blähungen und Unfruchtbarkeit. Außerdem, heißt es, „stärkt er das Gehirn und die Kräfte der Natur ..., bewirkt die Verdauung der Nahrung und macht gutes Blut“. Weil Rotwein aber zu Kälte und Trockenheit neigte, wurde er gern gezuckert, gewürzt und – als „Hippokras“ – warm genossen. Die Gäste unserer Tafelrunde des 16. Jahrhunderts konnten also unbesorgt zugreifen und ein für ihre Begriffe gesundes Mahl genießen.

Beliebte Rezepte vor dem 17. Jahrhundert



Kamelinsoße

„Um eine köstliche Kamelinsoße zu machen, nimm geschälte Mandeln, zerstoße sie und streiche sie durch ein Sieb; nimm Rosinen, Zimt, Nelken und ein kleines Stück Brot, mische alles zusammen, und verrühre es mit Verjus.“*

* Saft unreifer Trauben



Blancmanger

„Nimm gekochte Hühnerbrust, lege sie auf den Tisch und hacke sie so fein du kannst. Dann wasch den Reis und trockne ihn. Mahle ihn zu Mehl und gib es durch ein Sieb; dann rühre diesen Reis mit Ziegen-, Schaf- oder Mandelmilch an und koche ihn in einer gut ausgewaschenen, sauberen Pfanne. Wenn er zu kochen beginnt, füge die gehackte Brust hinzu sowie weißen Zucker und gebratenen weißen Schweinespeck. Halte Rauch davon fern und lass es milde, ohne zu viel Feuer kochen, bis es so dick ist, wie Reis eben sein sollte. Dann gib es mit zermahlenem oder zerstoßenem Zucker und mit gebratenem Schweinefett zu Tisch.“



Hippokras

*„Um ein Lot guten Hippokras zu machen, nimm eine Unze cinamonde, genannt langer Pfeifenzimt, eine Ingwerknolle und ebenso viel Galgant**, verreibe dies gut miteinander, und gib dann ein Pfund guten Zuckers zu. Zerstampfe dies alles miteinander und gieße mit einer Gallone des besten Burgunders auf, den du bekommen kannst; lass alles ein oder zwei Stunden ruhen. Treibe es mehrmals durch ein Stoffsieb, dann wird es ganz klar.“*

** Wurzel eines Ingwergewächses

QUELLE: THE MEDIEVAL KITCHEN: RECIPES FROM FRANCE AND ITALY, UNIVERSITY OF CHICAGO PRESS, 1998

Das Vermächtnis des Paracelsus

Ganz anders dachte die Ärzte-Generation, die Mitte des 17. Jahrhunderts an die europäischen Höfe kam. Ihre Ansichten waren beeinflusst von den Lehren des deutschen Wanderdoktors Paracelsus (1493–1541), der ab 1520 das Theoriegebäude der klassischen Medizin zu verspotten begann. Sein hochfahrendes Wesen und seine radikalen religiösen Überzeugungen hatten ihm einen schlechten Ruf eingebracht, deshalb mochten sich nur wenige Ärzte offen zu seinem Vermächtnis bekennen; aber auch ohne ausdrückliche Berufung auf ihn war die geistige Verbindung unübersehbar: Wie seinerzeit Paracelsus erklärten diese Hofärzte die Lehre vom universellen Lebensprinzip des Garens und von den aristotelischen Elementen für irrig.

Noch heute debattieren Wissenschaftshistoriker über die Ursachen dieses veränderten Weltbildes. Eine gewisse Rolle scheint die zunehmende Bedeutung der Destillation gespielt zu haben. Seit dem späten Mittelalter begannen Alchimisten und Quacksalber mit der Erhitzung von allerlei Stoffen aus der Natur zu experimentieren – darunter auch Essbares wie Fenchel, Muskatnuss oder Gewürznelken. Dabei stellten sie fest, dass sich die Ausgangssubstanzen regelmäßig in drei Fraktionen zersetzten: eine flüchtige, „geistige“ Flüssigkeit („Spiritus“), einen öligen Anteil und einen festen Rückstand.

Solche Beobachtungen veranlassten Paracelsus, die vier Elemente der Antike durch drei neue Grundstoffe zu ersetzen: Mercurius (Quecksilber), Sulfur (Schwefel) und Sal (Salz); sie sollten jeweils die Essenz des Flüssig-Flüchtigen, des Ölig-Brennbaren und des erdhaften Feststoffes verkörpern. (Dabei sind Quecksilber, Schwefel und Salz nicht gleichzusetzen mit den gleichnamigen chemischen Elementen oder dem heutigen Speisesalz.) Sal bestimmte in diesem Schema den Geschmack und die Konsistenz der Nahrung, Mercur war die Quelle von Duft und Aroma, und Sulfur lieferte Feuchte und Süße; außerdem vermittelte der Schwefel zwischen den beiden anderen, eigentlich gegensätzlichen Elementen.

Auch die Verdauung wurde nun anders gedeutet: nicht mehr als Garen, sondern als „Fermentation“ oder Gärung (meist allgemein im Sinne einer chemischen Umsetzung verstanden). Dieser alltägliche und dennoch geheimnisvolle Vorgang fand im 17. Jahrhundert besonderes Interesse. Weil die Fermentation mit einer leichten Erwärmung und der Bildung flüchtiger Stoffe einherging, schien sie mit der Verwesung, der Destillation und der Wechselwirkung von Säuren und Basen verwandt oder sogar identisch zu sein. Besonders von den „Dämpfen“, „Geistern“ oder „Lüften“, für die der Holländer Johann Baptist van Helmont (1577–1644) bald den Begriff „Gase“ prägen sollte, waren die damaligen Chemiker fasziniert; sie sahen darin die Essenz des jeweiligen Ausgangsstoffes.

Viele angesehene Mediziner des 17. Jahrhunderts, darunter van Helmont, Franciscus Sylvius (1614–1672) von der Universität Leiden und Thomas Willis (1621–1675), seinerzeit der bekannteste ▶

Arzt Englands und Gründungsmitglied der Royal Society of London, vertraten diese neue Sicht des Verdauungsvorgangs. Danach machten die sauren, scharfen Magensäfte aus der Nahrung eine weiße, milchige Flüssigkeit, der im Verdauungstrakt die alkalische Galle zugesetzt wurde; daraufhin begann die Mischung zu gären und Gase zu bilden, wobei sie zu einer salzartigen Substanz wurde, die der Körper schließlich in Blut und andere Flüssigkeiten umwandeln konnte.

Literaturhinweise

Die Kochkunst des Mittelalters. Von Odile Redon, Françoise Sabban und Silvano Servi. Eichborn, 1993.

Acquired Taste: The French Origins of Modern Cooking. Von T. Sarah Peterson. Cornell University Press, 1994.

The French Paracelsians: The Chemical Challenge to Medical and Scientific Tradition in Early Modern France. Von Allen G. Debus. Cambridge University Press, 1991.

Medieval and Early Renaissance Medicine: An Introduction to Knowledge and Practice. Von Nancy G. Siraisi. University of Chicago Press, 1990.

Wie ihre Vorgänger im 16. Jahrhundert weiteten die Mediziner auch jetzt ihre Vorstellungen zum Schema eines universellen Lebenskreislaufs aus. Aus Samen entstünden durch das Wirken der „Fermente der Erde“ die Pflanzen, erklärte der passionierte Gartenbauer John Evelyn 1675 vor der Royal Society. Gärung verwandle Getreide und Früchte in Brot, Bier und Wein, die das Verdauungssystem weiter fermentieren könne. Mit der Verwesung der Abfallstoffe beginne der Kreislauf von neuem. „Das Verfaulen der Pflanzen ähnelt sehr stark der tierischen Verdauung“, erklärte John Arbuthnot, Mitglied der Royal Society und Leibarzt von Queen Anne, in einem 1732 erschienenen Handbuch der Nahrungsmittel. Noch immer erschien die Welt als Küche, nun allerdings mit Braubottichen ausgestattet, von denen sich Miniaturausgaben auch im menschlichen Körper befanden.

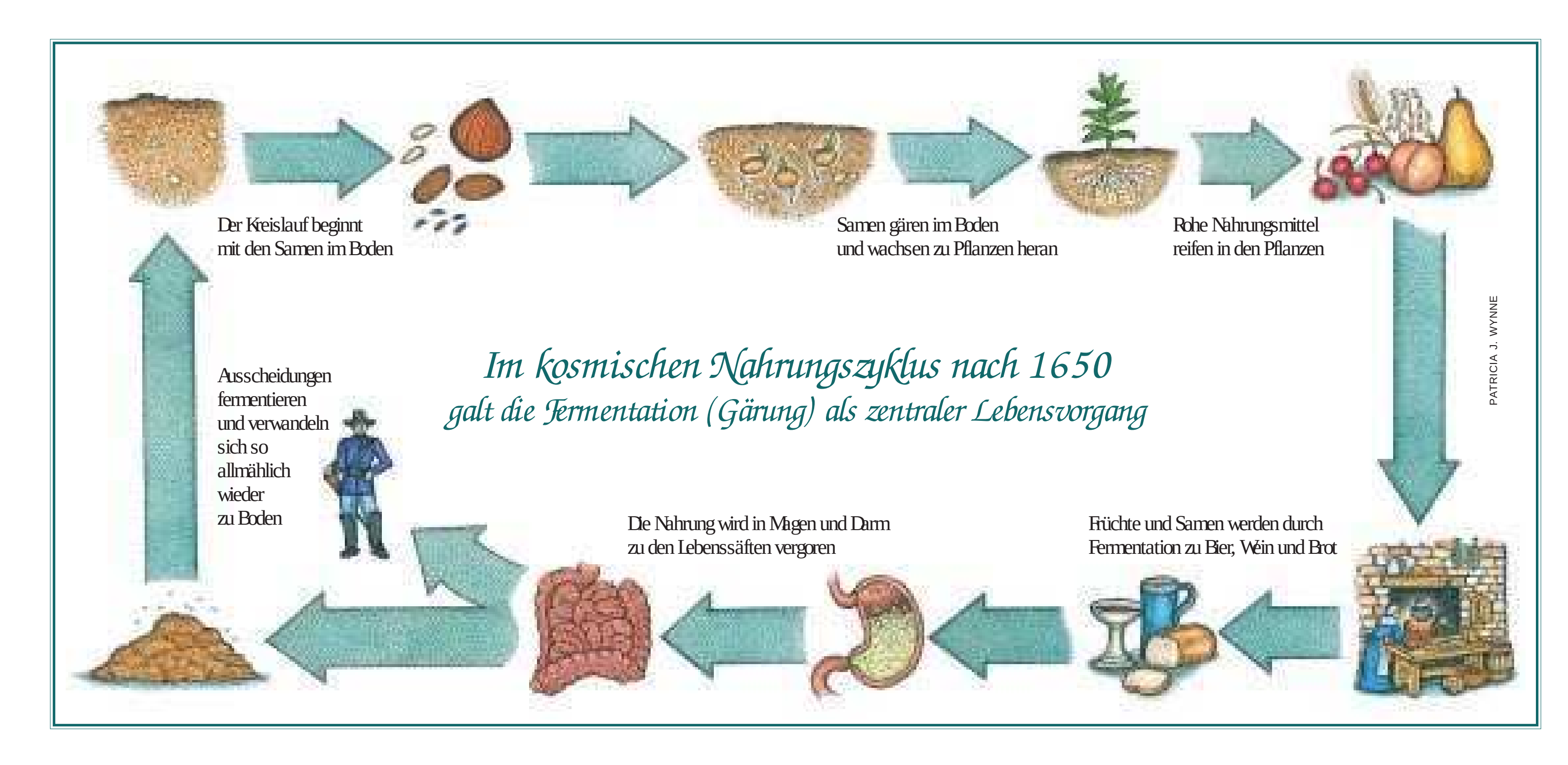
Dieser veränderten Sichtweise passte sich auch die Zunft der Küchenmeister an. Aufgeweckte Köche nutzten die Gunst der Stunde und verschafften sich Ansehen mit der Kreation von Speisen, die nach den neuen Maßstäben gesundheitsförderlich waren – und nebenbei auch noch dem Gaumen behagten. Gerne verwendeten sie zum Beispiel Austern, Sardellen, Blattgemüse, Pilze und Obst, weil diese Nahrungsmittel alle leicht fermentierten und daher nicht aufwendig zubereitet werden mussten, um besser verdaulich zu sein. Mit der steigenden Beliebtheit frischer Pflanzenprodukte kamen auch der Gartenbau und Botanische Gärten groß in Mode. Forscher und Privatgelehrte tauschten Sämereien aus, übersetzten Gartenbücher und entwickelten spezielle Gewächshäuser für zartes Gemüse. Auf Beeten aus verrottendem Dung begann man Pilze zu kultivieren, und wohlhabende Engländer aßen nun sogar Auberginen, die sie bisher als widerwärtig abgelehnt hatten.

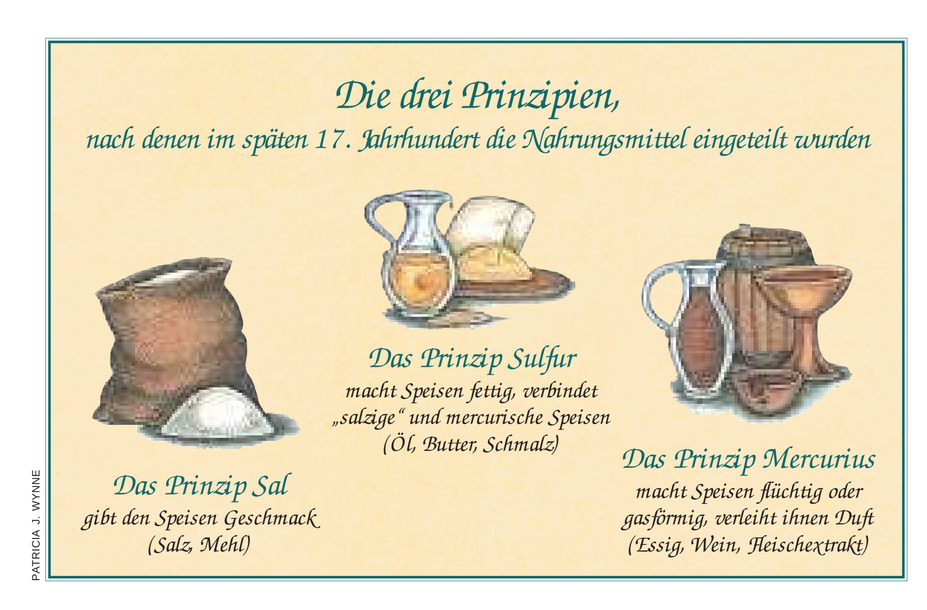
Butter, Schmalz, Olivenöl und andere Fette bildeten dank ihrer angeblichen Fähigkeit, „Mercurisches“ und „Salziges“ zu verbinden, nun die Basis vieler neuer Soßenrezepte, in denen zum Beispiel Mehl und Speisesalz das Element Sal beisteuerten, während Essig, Wein, Spirituosen und Fleisch- oder Fischextrakte für die Mercur-Komponente sorgten. Die erste Mehlschwitze aus Fett, Mehl und Wein oder Fond – eine Kombination mit einem eigenen, köstlichen Geschmack – beschrieb François Pierre de la Varennes 1651 in seinem Buch „Der französische Koch“. Viel Anklang fanden auch leicht verdauliche Blattsalate mit Soßen auf Ölbasis, etwa der Vinaigrette, die Evelyn 1699 in seinem Traktat „Acetaria: eine Abhandlung über Salate“ empfahl.

Die Verbannung des Zuckers

Während sich Früchte, Kräuter und Gemüse als feste Bestandteile der Hauptmahlzeit etablierten, fiel der früher als Allheilmittel gepriesene Zucker bei den chemiekundigen Ärzten in Ungnade. „Unter seinem weißen Äußeren“, monierte 1606 Joseph Duchesse, Leibarzt des französischen Königs Henri IV., „verbirgt der Zucker eine große Schwärze“ – die Ärzte wussten, dass die Zähne davon schwarz wurden – „und unter seiner Süße eine sehr große Schärfe, die der von aqua fortis [Salpetersäure] gleichkommt.“

Ihm sekundierte der britische Arzt Willis, der bei bestimmten Kranken, die wir heute Diabetiker nennen würden, die Ausscheidung zuckerhaltigen Urins beobachtet hatte: „Zucker, rein destilliert, ergibt eine Flüssigkeit, die aqua fortis kaum nachsteht ... Daher ist es sehr wahrscheinlich, dass das Versetzen fast aller unserer Nahrung mit Zucker, und zwar in





PATRICIA J. WYNNE

großen Mengen und täglich, das Blut und die Säfte salzig und scharf macht; und damit skorbutisch.“ Zucker war also bedenklich, wenn nicht gar ein Gift.

Derlei düstere Warnungen taten ihre Wirkung. Jeder Koch hätte es sich dreimal überlegt, seine Gäste zum Verzehr des verpönten Stoffs zu nötigen, indem er ihn einfach über die Hauptgerichte streute. So geriet der Zucker an den Rand der Speisenfolge und tauchte nur noch in Desserts auf, die überdies in einer separaten Küche zubereitet wurden. Die neue Einstellung zum Zucker äußert sich auch im Aufkommen einer ganzen Gattung von Büchern, die sich ausschließlich mit seiner Eignung zum Verzieren und Garnieren befassten und kein Wort über seinen Wert für die Ernährung oder Gesundheit verloren.

Spirituosen und andere Destillate galten als wirksame Arzneien. Zwar war gegen ein Schlückchen Kräuterlikör oder ein Schnäpschen hin und wieder nichts einzuwenden, aber für den täglichen Konsum erschienen sie aus medizinischer Sicht zu stark. Für leichter verdaulich hielt man die nicht so konzentrierten Extrakte, die aus Fleisch oder anderen nahrhaften Lebensmitteln durch Kochen oder Vergären hergestellt wurden. Sich entwickelnde Gasbläschen begrüßte man als Essenz und Ausdruck der Güte einer Speise sowie als Gehirnnahrung. Sprudelnde Mineralwässer erfreuten sich außerordentlicher Beliebtheit, und überall in Europa wurden Heilbäder eröffnet. Bei Tisch wich der heiße, würzige Hippokras kühlen Weinen und dem prickelnden Champagner, der wohl gegen Ende des 17. Jahrhunderts erfunden wurde.

Für sehr gesundheitsförderlich hielt man Fleisch- oder Fischextrakte, die als Fond, Bouillon oder Gelee serviert wurden. Dabei sollte das Fleisch von Landtieren, insbesondere von Rindern, einen nahrhafteren Saft ergeben als Fisch oder Geflügel. Eine Vielzahl von Rezepten für liebevoll garnierte Rinderbouillons beschrieb Vincent la Chapelle, ein französischer Koch in den Diensten des Earl von Chesterfield in England, im Jahre 1733 in seinem Buch „Der moderne Koch“, das in kürzester Zeit auch ins Französische übersetzt wurde.

Die ersten Restaurants

Bald entdeckten Unternehmer das Geschäftspotenzial dieser neuen Küche und verkauften die „Restaurants“, zu deutsch „Stärkungsmittel“, an Haushalte ohne eigenen Koch. Das aufstrebende europäische Bürgertum bemühte sich, es dem Adel gleichzutun, und kam so auch auf den Geschmack der „Restaurants“ und der neuen Küche überhaupt.

Diese Speisen galten als Zeichen einer verfeinerten Lebensart – nicht nur aus Geschmacksgründen, sondern auch, weil die einzelnen Nahrungsmittel darin in ihrer stärksten, am höchsten veredelten Form auftraten. Der Autor der gastronomischen Abhandlung „Die Gaben des Comus“ (Paris 1739; *comus* ist die latinisierte Form von griechisch *komos* = Festschmaus) drückte es so aus: „Die Arbeit eines modernen Kochs gleicht der eines Chemikers. Die Kochkunst besteht darin, die Nahrungsmittel aufzuschließen, in ihre Quintessenzen zu zerlegen und diese zu extrahieren, dadurch die leichten und nahrhaften Säfte freizusetzen und diese schließlich wieder zu vereinigen und zu mischen.“

Die neue Ernährungsweise breitete sich allmählich über ganz Europa aus und drang dabei auch zu den niedrigeren Gesellschaftsschichten vor. Mitte bis Ende des 19. Jahrhunderts hatte sie sich im englisch- und französischsprachigen Europa, in den USA, in Kanada und Australien durchgesetzt. Die islamische Welt und Lateinamerika hingegen blieben unberührt von den chemisch-medizinischen Ideen des Paracelsus und der davon abgeleiteten Ernährungstheorie. Nicht von ungefähr erinnern uns daher die Currys der indischen und die Moles der mexikanischen Küche an Gerichte, die man in Mitteleuropa vor Paracelsus kannte.

Die westliche Küche, ein Kind des 17. Jahrhunderts, sollte sich als wesentlich zählebiger erweisen als die ihr zu Grunde liegenden Lehrmeinungen. Am Ende des 18. Jahrhunderts hatten in Chemie und Medizin bereits die Forschungen begonnen, denen wir unser heutiges Wissen über Kalorien, Kohlenhydrate, Proteine, Vitamine und Mineralstoffe verdanken. Doch im 19. und 20. Jahrhundert war das zentrale Thema die Versorgung der Massen: Wie hatte eine billige, aber ausreichende Ernährung für wenig begüterte Schichten wie Fabrikarbeiter und Soldaten auszusehen? Nicht mehr den Reichen, sondern den Armen galt also das Hauptaugenmerk der neueren Ernährungswissenschaft, während die Entwicklung der westlichen Cuisine durch die Küchenchefs der besseren Gesellschaft weiterhin den Vorgaben des 17. Jahrhunderts folgte.

Heute kann in den westlichen Industrienationen zwar fast jedermann so essen wie früher nur die Wohlhabenden, aber inzwischen kennen wir auch die Schattenseiten dieser Ernährungsweise. Der gesundheitliche Wert von frischem Obst und Salat ist immer noch unbestritten, aber der Fettreichtum unserer Nahrung (eine Folge der überkommenen Vorliebe für Fleisch und fettige Soßen) dürfte für den hohen Anteil übergewichtiger Menschen in den meisten hoch entwickelten Ländern verantwortlich sein. Deshalb arbeiten Ärzte und Köche nun wieder gemeinsam an einer neuen Küche, welche bei aller angestrebten Schmackhaftigkeit auch die neuesten Erkenntnisse aus Physiologie und Ernährungslehre berücksichtigt – wie schon einmal vor 350 Jahren.

Rachel Laudan *hat an der Universität London in Geschichte und Wissenschaftsphilosophie promoviert und an mehreren amerikanischen Universitäten Wissenschafts- und Technikgeschichte gelehrt. Sie ist Autorin des Buches „From Mineralogy to Geology: The Foundations of Science 1650–1830“ (University of Chicago Press, 1987) und erhielt den Jane-Grigson-Preis für Nahrungsmittelkunde der Julia-Kinderkochbücher-Stiftung.*

Das Ende des freien Willens?

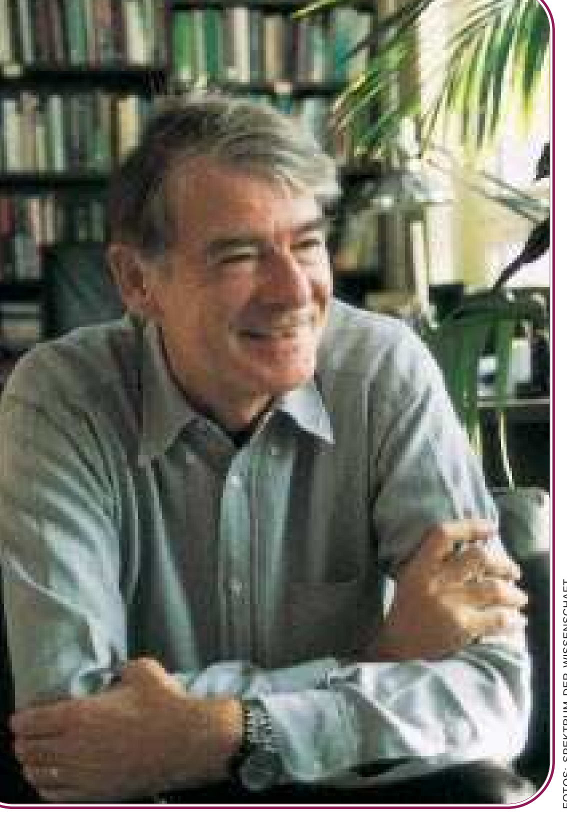
Neue Erkenntnisse der Hirnforschung verändern unser Bild vom Menschen. Prof. Dr. Wolf Singer, Direktor am Max-Planck-Institut für Hirnforschung, äußert sich über Bewusstsein, die Grenzen des freien Willens und die Folgen für unser Rechtssystem und Erziehungswesen.

Spektrum: *Herr Professor Singer, war es Ihr freier Wille, uns hier und jetzt ein Interview zu geben?*

Singer: Ich fürchte nein, und die Bedingtheiten kennen Sie: Dem Gespräch gingen Telefonate voraus und dann gewisse kognitive Prozesse in meinem Gehirn, die letztlich dazu führten, dass ich zugesagt habe, das Interview zu führen.

Spektrum: *Ihr Kollege, der Hirnforscher Gerhard Roth, hat unlängst in einem Spektrum-Interview die Behauptung gewagt, unser freier Wille existiere eigentlich gar nicht und sei nur eine nützliche Illusion. Wie denken Sie darüber?*

Singer: Die Frage des freien Willens ist eine der wichtigsten, die gegenwärtig an der Berührungsfläche zwischen Natur- und Kulturwissenschaften diskutiert werden. Das Problem ist, dass wir als Naturwissenschaftler bei der Beschreibung unserer Forschungsobjekte stets aus der Dritte-Person-Perspektive urteilen: Untersuchungsgegenstand und Untersuchender sind nicht identisch. Bei der Suche nach den neuronalen Grundlagen psychischer Phänomene wie Bewusstsein oder freier Wille untersucht der Forscher sich jedoch selbst – betrachtet Phänomene aus der Dritte-Person-Perspektive, die er zugleich aus der Ich-Perspektive der ersten Person wahrnimmt.



FOTOS: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Spektrum: *Wo liegt das Problem?*

Singer: Wir finden weder sinnhafte Zuschreibungen noch kulturelle Konstrukte in unserem Forschungsobjekt, dem Gehirn.

Spektrum: *Bitte konkretisieren Sie das!*

Singer: Ich meine Phänomene wie Intentionalität, also das absichtsvolle Handeln oder eben den so genannten freien Willen. Denken Sie aber auch an soziale Realitäten wie zum Beispiel Wertesysteme! Diese Phänomene erschließen sich nur der subjektiven Erfahrung, gehören aber dennoch zu den erforschbaren Wirklichkeiten. Wir empfinden uns als „frei“, wir handeln auch danach, ja ziehen Menschen sogar zur Verantwortung, weil wir annehmen, sie seien „frei“. Diese Konzepte haben auch insofern den Status von Realitäten, als sie sehr wirksam sind. Sie bestimmen unser Handeln, bestimmen unser Rechtssystem, unsere Erziehungsweisen.

Spektrum: *Leidet die Hirnforschung also an einer Art Messproblem?*

Singer: An einem Problem der Unvereinbarkeit verschiedener Beschreibungssysteme, würde ich sagen. Das ist mehr als ein Messproblem. Wir beschreiben die Phänomene, die ich gerade angesprochen habe, in der subjektiven Erste-Person-Perspektive. Anders sind sie gar nicht fassbar. In der Dritte-Person-Perspektive der naturwissenschaftlichen Beschreibungsweise existieren diese Phänomene nicht.

Spektrum: *Nur ich erlebe, dass ich etwas Bestimmtes tun will, aber niemand anders ...*

Singer: Niemand anders außer Ihnen. Zugriff auf die Empfindungen und Bewertungen des Gegenübers erhalte ich nur indirekt mit Hilfe einer Theorie des Geistes.

Spektrum: *Das bedeutet?*

Singer: Lassen Sie mich etwas ausholen! Tiere können sich im Allgemeinen nicht vorstellen, was im Kopf des anderen Tieres vor sich geht, wenn dieses sich in einer bestimmten Situation befindet. Selbst hoch entwickelte Tiere können dies nur dann, wenn das beobachtete Tier seine Stimmung eindeutig zu erkennen gibt. Wenn Schimpansen einen Artgenossen in Wut sehen, dann wissen sie: Jetzt ist er wütend. Aber wenn sie einen anderen Schimpansen still sitzen sehen, der eine Spinne sieht und offenbar gar nicht darauf reagiert, dann können die sich nicht vorstellen, dass er Angst hat und nur deshalb ruhig sitzen bleibt, weil er vortäuschen will, keine Angst zu haben. Allein wir Menschen können solche Interpretationsleistungen erbringen. Nur wir können uns vorstellen, was im anderen vorgehen könnte, wenn er sich in einer bestimmten Situation befindet. Hier sprechen wir von der Fähigkeit, eine Theorie des Geistes aufzustellen.

Spektrum: *Können Sie mit einer Theorie des Geistes Zugriff auf die individuelle Eigenempfindung eines anderen Menschen erlangen?*

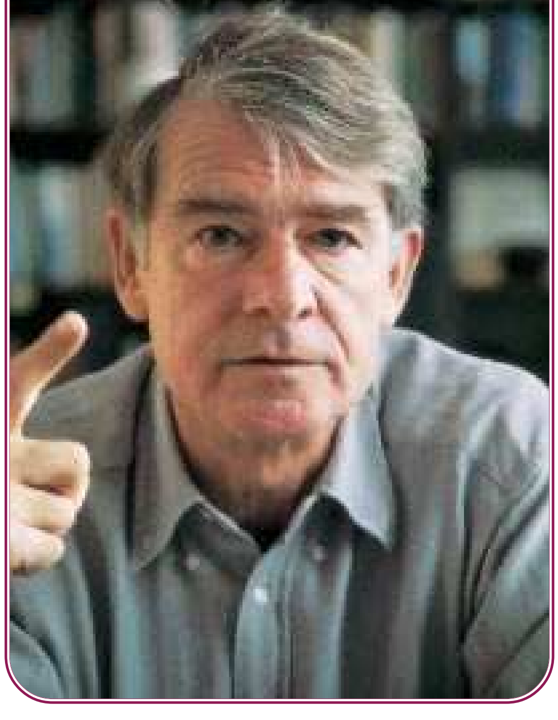
Singer: In gewisser Weise ja. Ich nehme an, dass Sie so empfinden wie ich. Ich schreibe Ihnen Freiheit zu, weil ich selbst sie in der ersten Person empfinde, und ich beurteile Sie entsprechend. Aber keinen der entsprechenden Inhalte bekomme ich aus der Dritte-Person-Perspektive zu fassen.

Spektrum: *Was ist bei der Frage nach dem freien Willen das Kernproblem?*

Singer: Das wesentliche Problem ist, dass wir annehmen, das Verhalten von ganz einfachen Organismen – Plattwürmern oder Schnecken etwa – lückenlos im Rahmen unserer naturwissenschaftlichen Beschreibungssysteme erklären zu können. Das bedeutet, wir können Verhalten auf neuronale Prozesse zurückführen. Niemand wird gegenwärtig bezweifeln, dass es möglich ist vorauszusagen, was ein Wurm als nächstes tun wird, wenn die Gesamtheit aller Erregungszustände seiner Nervenzellen messbar wäre.

Spektrum: *Ist das denn schon Stand der Forschung?*

Singer: Bei ganz einfachen Tieren – oder sagen wir besser: Nervensystemen – ist es schon fast möglich.



Spektrum: *Sie meinen, Sie haben es vielleicht noch nicht ganz erreicht, aber bald?*

Singer: Wir glauben zumindest, dass es prinzipiell möglich ist. Wir müssen dazu nur technische Probleme überwinden, die mit der Komplexität und den Messinstrumenten zu tun haben.

Spektrum: *Und wo liegt nun die Schwierigkeit?*

Singer: Die Schwierigkeit liegt darin, dass wir unsere Evolutionstheorien für zutreffend halten und viele Hinweise dafür haben, dass sich die Herausbildung komplexer Organismen tatsächlich so vollzogen hat, wie es in Darwins Theorie dargestellt wird. Wir gehen also davon aus, dass bei der Evolution der Arten alles „mit rechten Dingen" zugegangen ist und dass sich die Ausbildung neuer, höherer Verhaltensleistungen ausschließlich der Entwicklung immer komplexerer Nervensysteme verdankt. Diese Entwicklung beruht wiederum durchweg auf Prozessen, die vollständig in der Dritte-Person-Perspektive beschreibbar sind. Mit anderen Worten: In der Kette von Ereignissen, die zur Ausbildung komplexer Organismen – letztlich zum Menschen – geführt hat, gibt es nirgends Sprünge. Ich muss keine Agenten ...

Spektrum: *... keinen Gott ...*

Singer: ... keine Agenten postulieren, die in der wissenschaftlichen Dritte-Person-Perspektive nicht darstellbar wären. Und dennoch entstehen offenbar aus der Wechselwirkung der auf diese Weise entstandenen komplexen Organismen Phänomene, die nicht mehr in dem Beschreibungssystem vorkommen, das erklärt, wie sich diese Organismen entwickelt haben. Der so genannte freie Wille ist dafür eines der faszinierendsten Beispiele.

Wir stoßen an Grenzen, wenn der „freie Wille" zum Objekt der Forschung wird

Spektrum: *Andererseits verfügen wir Menschen aber doch über unser eigenes Erleben als Beschreibungssystem. Das eigene Erleben ist für uns selbstverständlich: Kein Mensch hält es für problematisch, dass er sich selbst erlebt, dass er ein Bewusstsein hat und dass er etwas Bestimmtes tun oder lassen will.*

Singer: Genau in diesem individuellen Erleben erfahren wir uns als „frei". Und daraus ergibt sich der Konflikt. Aus einem Entwicklungsprozess, der sich lückenlos aus der Dritte-Person-Perspektive mit naturwissenschaftlichen Termen beschreiben lässt, gehen Phänomene hervor, die in diesem Beschreibungssystem nicht mehr vorkommen. Letztere werden durch subjektives Erleben erfasst und im zwischenmenschlichen Diskurs thematisiert. Und wie gesagt, es handelt sich auch hierbei um etwas Reales: um erlebbare soziale Realitäten.

Spektrum: *Stößt hier die Naturwissenschaft an ihre Grenze?*

Singer: Just an diesem Punkt entzündet sich die heftige Debatte: Kann Naturwissenschaftlern überhaupt zugetraut werden, sich auch zu diesen, eigentlich nur in der Erste-Person-Perspektive fassbaren Realitäten zu äußern? Die einen meinen ja. Dies sind meist Naturforscher, die für die Einheit der Wissenschaft plädieren. Die anderen – meist Kulturforscher – behaupten, hier würden Kategorien-Fehler gemacht, und das Vorhaben einer Einheitswissenschaft sei prinzipiell nicht realisierbar.

Spektrum: *Und wo stehen Sie?*

Singer: Ich denke, dass hier nichts anderes vorliegt als in allen anderen Situationen, in denen man zwischen verschiedenen Beschreibungssystemen hin- und herwechselt. Das ist uns doch geläufig, gerade innerhalb der Naturwissenschaften. Sehr oft sind Phänomene, die es zu erklären gilt, in anderen Beschreibungssystemen erfasst als die elementaren Prozesse, die den jeweiligen Phänomenen zu Grunde liegen.

Spektrum: *Könnten Sie bitte ein Beispiel nennen?*

Singer: Die Verhaltensleistung eines höher organisierten Tieres wird in Begriffen beschrieben, die zunächst in der Neurobiologie nicht vorkommen. Wir sprechen beispielsweise von „Aufmerksamkeit": Wir sagen, ein Tier sei jetzt „aufmerksam", oder es lenke seine „Aufmerksamkeit" auf einen bestimmten Reiz. Wir benutzen zur Definition einer kognitiven Leistung, deren neuronales Substrat wir erklären wollen, Begriffe, die wir Beschreibungssystemen entlehnen, die wir aus der Erste-Person-Perspektive heraus entwickelt haben. In diesen Beschreibungssystemen kommen Neuronen naturgemäß nicht vor.

Spektrum: *Sie legen hier also eine Theorie des Geistes zu Grunde.*

Singer: Richtig. Ich identifiziere Phänomene, die ich nur erkennen kann, weil ich über subjektive Erfahrungen verfüge und über die Fähigkeit, deren Inhalte sprachlich zu fassen. Damit bin ich in der Lage, kognitive Leistung zu definieren, für die ich dann aus der Dritte-Person-Perspektive neuronale Korrelate suchen kann, also Korrelate, die in naturwissenschaftlichen Beschreibungssystemen darstellbar sind.

Spektrum: *Das wird aber sehr schwierig sein.*

Singer: Erstaunlicherweise nicht. Im Gehirn von Affen und anderen Säugetieren finden sich Strukturen, die selektiv aktiv werden, wenn das Tier seine Aufmerksamkeit steigert oder auf bestimmte Inhalte lenkt. Es lässt sich sogar bestimmen, auf welchen Sinneskanal oder auf welchen Inhalt das Tier seine Aufmerksamkeit jeweils gerichtet hat. Wenn das Tier seine Aufmerksamkeit auf ein bestimmtes Objekt lenkt, werden Nervenzellen, die auf dieses Objekt reagieren, stärker aktiv oder synchronisieren ihre Antworten. Ganze Gruppen von Nervenzellen schließen sich zu synchron oszillierenden Ensembles zusammen, wenn die Inhalte, die sie codieren oder vermitteln, mit Aufmerksamkeit belegt werden. Auch gibt es im Gehirn Nervenzellen, die nur dann aktiv werden, wenn das Tier wach und aufmerksam ist.

Spektrum: *Sie haben eben nur von einem „Korrelat" gesprochen. Gibt es keine kausalen Zusammenhänge zwischen den Gehirnprozessen, die Sie als Wissenschaftler aus der Dritte-Person-Perspektive beschreiben, und dem Phänomen „Aufmerksamkeit", das der Erste-Person-Perspektive entstammt?*

Singer: Doch, das sind ja kausale Beziehungen. Es ist nur schwierig, das zu beweisen.

Spektrum: *Ah, jetzt wird es spannend!*

Singer: Man kann durchaus neuronale Strukturen angeben, die für Aufmerksamkeitsprozesse verantwortlich sind. Die besten Beispiele dafür kommen aus der Klinik: Wenn bestimmte Strukturen des Gehirns zerstört werden, sind die Patienten nicht mehr in der Lage, ihre Aufmerksamkeit auf bestimmte Bereiche ihrer Wahrnehmungswelt zu richten. Häufig betrifft das dann Körperregionen oder einen Teil des Gesichtsfeldes. Das Gleiche kennen wir aus Tierversuchen. Wenn bestimmte Hirnstrukturen vorübergehend inaktiviert werden – durch Kühlung zum Beispiel – kommt es zu Aufmerksamkeitsdefiziten, die zu den gleichen Verhaltensänderungen führen wie beim Menschen. Auf diese Weise lässt sich eine direkte Ursache-Wirkung-Beziehung herstellen.

Spektrum: *Sie kennen also die materielle Ursache des Erlebens?*

Singer: In diesem Fall kennen wir die materielle Ursache für das Vermögen, Aufmerksamkeit auf bestimmte Inhalte zu richten – und daraus folgend für das Vermögen, diese Inhalte „bewusst" wahrzunehmen, im Gedächtnis abzuspeichern, sich daran zu erinnern.

Spektrum: *Damit haben Sie eine von vielen Ursachen für ein bestimmtes Erleben identifiziert.*

Singer: Richtig. Im Fall der Aufmerksamkeit gelingt das schon recht gut. Im Hinblick auf das Bewusstsein kann man zumindest angeben, welche Strukturen intakt sein müssen, damit Bewusstsein überhaupt möglich ist. Was uns noch schwer fällt, ist, das neuronale Korrelat für Bewusstsein an sich zu identifizieren. Wir wissen noch nicht, wie die Repräsentation der Inhalte des Bewusstseins im Gehirn organisiert ist. Das muss irgendein verteilter Zustand sein, der sich jedoch unseren analytischen Möglichkeiten noch entzieht. Ein singuläres Zentrum, in dem das Bewusstsein zu lokalisieren wäre, gibt es jedoch mit Sicherheit nicht.

Spektrum: *In welcher Beziehung stehen denn nun Aufmerksamkeit und freier Wille? Meine Aufmerksamkeit kann ich doch frei lenken, oder?*

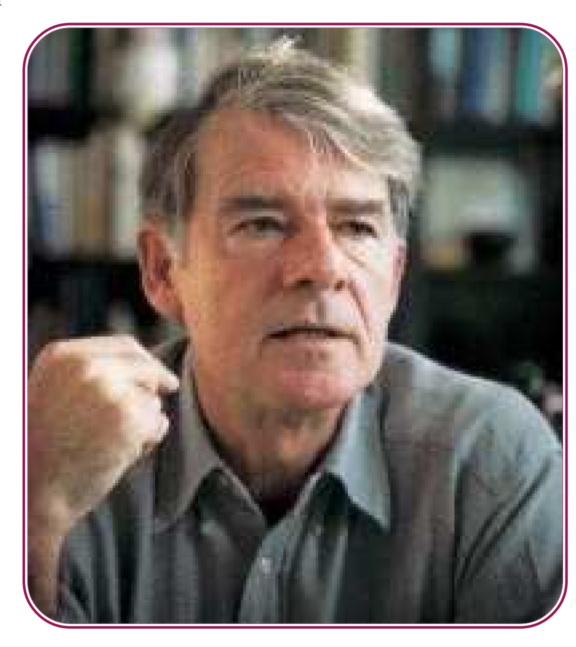
Singer: Jetzt fragen Sie, ob ich meine Aufmerksamkeit über meinen so genannten freien Willen von A nach B lenken kann, oder ob sich meine Aufmerksamkeit nicht vielmehr – einem sich selbst organisierenden Prozess folgend – auf auffällige Strukturen richtet. Ganz sicher tut sie das ja, wenn äußere Reize meine Aufmerksamkeit auf sich ziehen. Wenn ich beispielsweise einen lauten Knall hinter mir höre, werfe ich „unwillkürlich" den Kopf herum, um zu sehen, was passiert ist.

Spektrum: *Ich kann mich doch auch freiwillig – ohne vorhergehenden äußeren Reiz – nach hinten umdrehen.*

Singer: Die Frage ist, wie „frei" Ihr Handeln dabei tatsächlich ist.

Spektrum: *Ich kann meinen Blick beliebig durch Ihr Büro schweifen lassen und empfinde mich dabei durch nichts Äußeres veranlasst ...*

Singer: Halt, nicht so schnell! Sie beschreiben die Dinge jetzt wieder aus der Erste-Person-Perspektive. Aber auch bei Ihrer scheinbar „freien" Änderung der Blickrichtung – ohne vorherigen Knall im Hintergrund –, bei der Entscheidung „von innen heraus", folgen Sie ja wieder Zuständen, die vom Gehirn zuvor erzeugt wurden – nur diesmal nicht infolge eines äußeren Reizes. In diesem Fall werden die Attraktoren, die Ihre Aufmerksamkeit lenken, von innen heraus erzeugt, als Folge der sich ständig wandelnden Zustände Ihres Gehirns.



Spektrum: *Bin ich dann sozusagen immer nur das Opfer meiner Gehirnzustände? Und ist das Gehirn oder sein momentaner Zustand denn nicht irgendwie auch Teil meines Selbst?*

Singer: Auch wenn das Gehirn scheinbar nichts tut, ist es stets damit beschäftigt, Inhalte zu ordnen, Bezüge herzustellen, Lösungen zu finden, Modelle zu entwerfen, sogar wenn Sie schlafen. Sie werden jedoch nur eines kleinen Teils dieser Arbeit gewahr. Ins Bewusstsein gelangt nur das Wenige, auf das Sie Ihre Aufmerksamkeit lenken können. Manche Vorgänge können wir sogar nie ins Bewusstsein heben. Denken Sie zum Beispiel an vegetative Kontrollfunktionen der Nierentätigkeit!

Spektrum: *Können wir denn zwischen dem Gehirn und der erkennenden Person überhaupt so penibel trennen?*

Singer: Das genau ist der Sprung zwischen den zwei Beschreibungssystemen.

Spektrum: *Aber das Ich-Erlebnis wird ja vom Gehirn „gemacht", ist insofern Bestandteil der Aktivität des Gehirns. Trotzdem erlebe ich mich als getrennt von der Aktion meines Gehirns, die ich nur sehr marginal verstehe.*

Singer: Und deshalb denke ich, dass das Problem des „freien Willens" daher rührt, dass wir Kulturwesen sind, Wesen mit Gehirnen, die uns in die Lage versetzt haben, eine Theorie des Geistes zu erstellen und damit kulturelle Konstrukte und soziale Realitäten aufzubauen, die für uns dann wiederum als Realitäten erfahrbar werden.

Spektrum: *Ist denn das Erlebnis, sich frei für dieses oder jenes entscheiden zu können, nur ein soziales Konstrukt? Ist es nur tradiert? Haben es die frühen Menschen einmal irgendwie entwickelt, und ab dann ist es immer nur noch von den Eltern an ihre Kinder weitergegeben worden?*

Singer: So würde ich das sehen.

Spektrum: *Dann wäre es denkbar, dass es irgendwo eine isolierte Menschengruppe gibt, die Vorstellungen ganz anderer Art entwickelt und tradiert hat und dass diese auch stabil sind.*

Singer: Vermutlich ja. Denken Sie daran, wie in bestimmten Religionsgemeinschaften Handlungsmotive erklärt wurden oder werden: Menschen empfinden sich als „gelenkt" und schreiben die Initiative für ihr Handeln nicht sich selbst zu, sondern einer Gottheit.

Spektrum: *Es könnte auch ein Teufel sein. Wir kennen ja den Begriff der Besessenheit.*

Singer: Es könnte auch ein Teufel sein. Solche Zuschreibungen finden wir in unserer eigenen Kulturgeschichte. Und wir wissen aus der Psychopathologie, was passiert, wenn ein Konstrukt wie der freie Wille zusammenbricht. Bei bestimmten Schizophrenie-Formen ist es gerade ein Leitsymptom, dass sich Patienten nicht mehr „frei" fühlen können. Sie empfinden sich als „gelenkt". „Es" spricht zu ihnen und befiehlt, obwohl dieses „Es" Teil ihres Selbst ist. Mit Hilfe der funktionellen Kernspintomografie lässt sich zeigen, dass es bei diesen Patienten zu abnormen Aktivitätsverteilun-

gen in der Hirnrinde kommt. Das halluzinierende Gehirn erzeugt selbst Aktivitätsmuster, die es als von außen kommend und es lenkend wahrnimmt.

Spektrum: *Kommen wir noch einmal auf unsere Ausgangsfrage zurück! Sie würden also ebenfalls behaupten, dass der „freie Wille“ lediglich eine Illusion ist, oder?*

Singer: Ich würde mich auf die Position zurückziehen, dass es zwei voneinander getrennte Erfahrungsbereiche gibt, in denen Wirklichkeiten dieser Welt zur Abbildung kommen. Wir kennen den naturwissenschaftlichen Bereich, der aus der Dritte-Person-Perspektive erschlossen wird, und den soziokulturellen, in dem sinnhafte Zuschreibungen diskutiert werden: Wertesysteme, soziale Realitäten, die nur in der Erste-Person-Perspektive erfahrbar und darstellbar sind. Dass die Inhalte des einen Bereichs aus den Prozessen des anderen hervorgehen, muss ein Neurobiologe als gegeben annehmen. Insofern muss, aus der Dritte-Person-Perspektive betrachtet, das, was die Erste-Person-Perspektive als freien Willen beschreibt, als Illusion definiert werden. Aber „Illusion“ ist, glaube ich, nicht das richtige Wort, denn wir erfahren uns ja tatsächlich als frei.

Spektrum: *Wie real ist unsere Freiheit denn nun?*

Singer: Sie ist als Erfahrung real. Ich habe beispielsweise gerade jetzt das Gefühl, dass ich auch aufstehen könnte. Ich tue es aber aus bestimmten Gründen nicht. Beim freien Willen ist es doch so, dass wohl fast alle Menschen unseres Kulturkreises die Erfahrung teilen, wir hätten ihn. Solcher Konsens gilt im Allgemeinen als hinreichend, einen Sachverhalt als zutreffend zu beurteilen. Genauso zutreffend ist aber die konsensfähige Feststellung der Neurobiologen, dass alle Prozesse im Gehirn deterministisch sind und Ursache für eine jegliche Handlung der unmittelbar vorangehende Gesamtzustand des Gehirns ist. Falls es darüber hinaus noch Einflüsse des Zufalls gibt, etwa durch thermisches Rauschen, dann wird die je folgende Handlung etwas unbestimmter, aber dadurch noch nicht dem „freien Willen“ unterworfen.

Spektrum: *Was sind die Konsequenzen dieser Vorstellungen? Wenn sich einmal Ihre Erkenntnis durchsetzt, der freie Wille sei nur in der Erste-Person-Perspektive real, aus Sicht der Naturwissenschaft jedoch nicht existent: Was wird sich in unserem Leben, in unserer Gesellschaft ändern, wenn der Urgedanke, die Menschen könnten ihre Entscheidungen „frei“ treffen, sich als hinfällig erweist? Können wir dann niemanden mehr zur Verantwortung ziehen?*

Singer: Ich glaube, dass sich an der Art, wie wir miteinander umgehen, nicht sehr viel ändern würde, wenn wir der naturwissenschaftlichen Sichtweise mehr Bedeutung zumäßen. Wir würden allerdings – und das wäre erfreulich – vermutlich ein wenig toleranter werden, nachsichtiger, verständnisvoller. Wir würden nicht so schnell aburteilen.

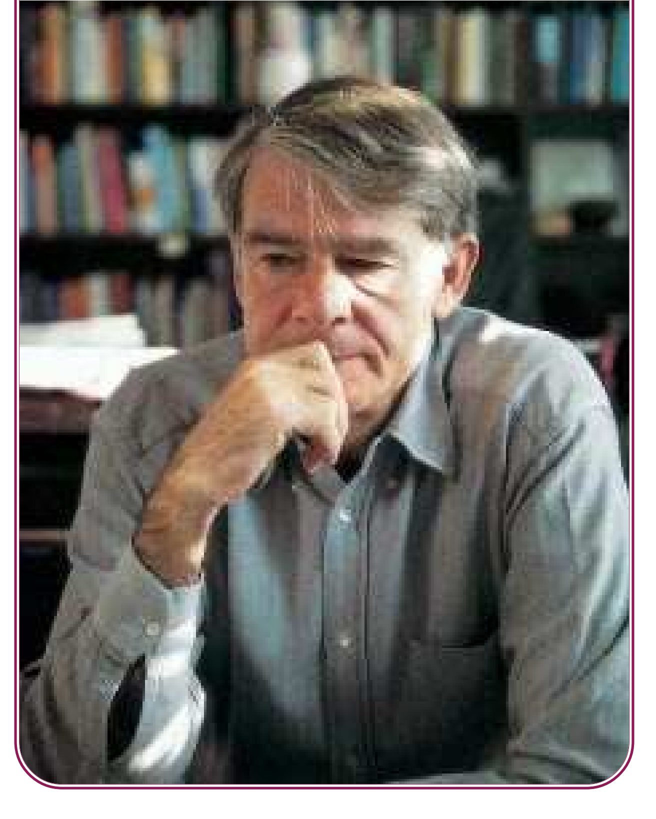
Spektrum: *Was sollte uns da nachsichtiger machen?*

Singer: Die gleiche Überlegung, die uns gegenüber Epileptikern und Schizophrenen nachsichtig gemacht hat. Als wir jene noch als vom Teufel besessen angesehen haben, haben wir sie ausgegrenzt, verurteilt und sind nicht sehr zimperlich mit ihnen umgegangen. Als wir dann begriffen haben, dass sie krank sind, haben wir zwar immer noch versucht, sie vor sich selbst zu schützen – oder uns vor ihnen, wenn sie für uns gefährlich wurden. Aber wir gehen wegen der Einsicht in die Bedingtheit ihres Verhaltens nun wesentlich humaner mit ihnen um. Wir haben sie als Opfer verstanden, die für ihre Handlungen nichts können. Ähnlich könnte ich mir vorstellen, dass unser Umgang mit Menschen, die wir heute als „Kriminelle“ bezeichnen, verständnisvoller werden könnte – ohne dass sich allerdings unser Strafvollzug grundlegend änderte.

Unser Umgang mit „Kriminellen“ könnte verständnisvoller werden

Spektrum: *Wie meinen Sie das denn?*

Singer: Nehmen wir einmal an, es gebe jemanden, der eine sehr niedrige Tötungsschwelle hat, aus welchen Gründen auch immer – genetisch bedingt, durch die Umwelt bedingt – spielt in diesem Fall gar keine Rolle. Aus einem nichtigen Anlass mordet dieser Jemand. Dann folgt für uns aus dem neuen Modell: Die fragliche Person ist für die Gesellschaft extrem gefährlich, weil sie ihre Tat bei jedem vergleichbaren Anlass immer wieder begehen könnte. Also muss man sich vor ihr schützen. Ich muss den Betreffenden also zunächst einmal daran hindern, dass



er seine Tat wiederholen kann und zweitens versuchen, ihn durch erzieherische Maßnahmen, durch Verhaltensbeeinflussung, zum Besseren hin zu bewegen. Ich muss daran arbeiten, diejenigen Attraktoren in seinem Gehirn zu stärken, die die fragliche Tötungsschwelle höher setzten. Wir würden Straftäter also wegsperren und bestimmten Erziehungsprogrammen unterwerfen, die durchaus auch Sanktionen einschließen. Wir wissen doch, dass Erziehung sowohl der Belohnung als auch der Sanktionen bedarf. Mit anderen Worten: Wir würden hübsch das Gleiche tun wie jetzt auch schon. Allein die Betrachtungsweise hätte sich geändert.

Spektrum: *Aus ihren Erfahrungen als Verhaltensforscher schöpfen Sie also ein optimistischeres Bild, was die Formbarkeit von Menschen anbelangt.*

Singer: Ich räume dieser Formbarkeit einen sehr großen Raum ein. Ich bin der festen Überzeugung, dass die wichtigsten Berufe in unserer Gesellschaft die von Eltern und Erziehern sind, jenen, die die Aufgabe haben, Verhaltensweisen und kulturelle Weisheiten in die nächste Generation zu übertragen. Und die dafür sorgen, dass Erfahrungen, die zu Friedfertigkeit ermuntern und für humanes Zusammenleben notwendig sind, auch so installiert werden, dass sie handlungsrelevant werden. Ich messe dieser Tradierung kultureller Inhalte einen enormen Einfluss bei. Nichts ist wichtiger als der erzieherische Prägungsprozess unserer Kinder. ■

Die Fragen stellten Inge Hoefer und Christoph Pöppe von Spektrum der Wissenschaft.

OPTRONIK

Lichtschalter für Glasfasernetze

Netzknoten sind der Flaschenhals der schnellen Kommunikationsleitungen, denn die Vermittlung von Signalen erfolgt bislang elektrisch.

Von Klaus-Dieter Linsmeier

Ein Terabit pro Sekunde – diese unglaubliche Datenrate, die rechnerisch der Bündelung von 16 Millionen ISDN-Kanälen entspricht, soll amerikanischen Prognosen zufolge bereits in fünf Jahren auf einer einzigen Glasfaser erreicht werden. Derzeit sind es vierhundertmal weniger: Die optischen Netze der Deutschen Telekom befördern zwischen den Großstädten 2,5 Gigabit (Milliarden Bit) pro Sekunde. Die enorme Leistungssteigerung wird teilweise das Ergebnis optimierter Übertragungstechniken auf dem Lichtleiter sein, sie lässt sich aber ohne ein neues Bauelement nicht denken: den optischen Schalter.

Denn ein Kommunikationsnetz besteht nicht allein aus Leitungsstrecken, Sendern und Empfängern, sondern auch aus Vermittlungsstellen, die Signale beispielsweise von einer Glasfaser auf eine andere schalten, bis sie am Bestimmungsort ankommen. Dafür muss man derzeit noch optische in elektrische Signale umwandeln und nach dem Schalten daraus erneut solche aus Licht generieren. Das setzt der Geschwindigkeit Grenzen: Derzeit sind zehn Gigabit pro Sekunde das Maximum beim Schalten, das Vierfache soll bald möglich sein.

Die Lösung für diesen Flaschenhals steht schon in den Startlöchern: Der rein optische Schalter, der ohne den Umweg über die Elektronen auskommt. Dieser könnte beispielsweise aus einem Signal, das mit 160 Gigabit pro Sekunde durch ihn durchrast, ein einzelnes Bit herausgreifen und auf einen anderen Weg bringen. Dazu sind Schaltzeiten von einer Billionstel Sekunde erforderlich. In dieser Zeit bewegt sich ein Düsenjet gerade einmal um einen Atomdurchmesser vorwärts. Nur Licht kann Licht so schnell schalten.

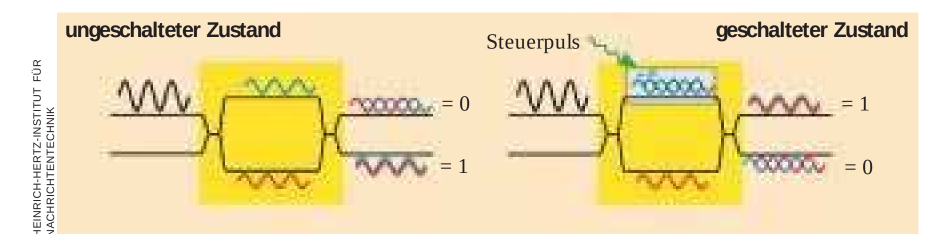
Warum hat man ein solches Bauelement nicht längst realisiert? Die Antwort gibt die Alltagserfahrung: Licht beeinflusst Licht normalerweise nicht, Wellen verschiedener Frequenzen durchdringen die Ausbreitungsmedien, ohne voneinander Notiz zu nehmen.

Doch dieses Alltagswissen ist streng genommen der physikalische Grenzfall für kleine Lichtintensitäten, die so genannte lineare Optik. Innerhalb ihrer Grenzen bleibt die Lichtgeschwindigkeit in einem Medium beziehungsweise seine Brechkraft unabhängig von der Intensität. Bei großen Werten aber gilt das nicht mehr, dort beginnt die nichtlineare Optik. Die wohl vielversprechendste Idee des optischen Schalters beruht auf ihren Prinzipien: Ein Steuersignal aus Licht verändert den Brechungsindex des Leitungsmediums so, dass Interferenzphänomene entstehen, die letztlich Lichtwege öffnen oder sperren.



RICHARD PHARAOH / IFA-BILDERTEAM

Licht ist das schnellste Transportmedium für Informationen schlechthin. Doch das Schalten der Verbindungen in den Knotenpunkten der Glasfasernetze bremst die Datenströme.





Reinhold Ludwig, Hans-Georg Weber und Stefan Dietz (im Foto von links nach rechts) entwickelten einen optischen Schalter – im Bild der Versuchsaufbau – auf der Basis eines Mach-Zehnder-Interferometers. Das nutzt Phasendifferenzen, um Lichtsignale durch Interferenz zwischen zwei Ausgängen zu schalten (Grafik). Dazu verändert ein optischer Steuerpuls den Brechungsindex eines nichtlinearen Elements.

Eine solche Lichtweiche entsteht am Berliner Heinrich-Hertz-Institut für Nachrichtentechnik in der Arbeitsgruppe von Hans-Georg Weber. Gemeinsam mit seinen Mitarbeitern Reinhold Ludwig und Stefan Dietz erhielt er dafür 1999 den Philip-Morris-Forschungspreis. Die Wissenschaftler modifizierten ein konventionelles Mach-Zehnder-Interferometer (Grafik oben). Es hat zwei Eingänge, von denen hier aber nur einer der Signalzuführung dient, intern gibt es zwei optische Koppler als Kreuzungspunkte der beiden Interferometerarme sowie zwei Ausgänge. Dieser Schalter bringt Signale auf einen von zwei möglichen Wegen.

Die Daten tragende Lichtwelle wird im ersten Koppler „halbiert“, die Teilwellen gelangen in die beiden Arme des Interferometers. Sobald sie Koppler Nummer zwei durchlaufen, entscheidet ein eventueller Phasenunterschied über das weitere Schicksal. Kommen gleiche Phasen – sozusagen die Momentaufnahmen der Wellen – zusammen, addieren sich die Amplituden (konstruktive Interferenz), und das ursprüngliche Signal ist das Ergebnis. Trifft hingegen bei einer Phasendifferenz von einer halben Wellenlänge Maximum auf Minimum, löschen sie sich gegenseitig aus (destruktive Interferenz).

Der Berliner Schalter nutzt in den Interferometerarmen einen optischen Halbleiterverstärker (SOA, siehe Kasten) als nichtlineares Element. Beide sind so abgeglichen, dass sich die Teilwellen ohne weitere Einflussnahme am Ausgang Eins konstruktiv, am Ausgang Zwei destruktiv überlagern. Ein Datenpuls wird also zunächst immer auf den mit Eins verbundenen Weg weitergeleitet. Um die Phasen geeignet zu verschieben und so das Signal auf den Ausgang Zwei zu schalten, erhält ein SOA einen optischen Steuerpuls, der seinen Brechungsindex verändert. Dazu reicht bereits ein Pikojoule, das ist ein Hundertbillionstel der Energie, die eine 100 Watt-Glühbirne pro Sekunde abstrahlt.

Ein Wort zu den Signalen selbst: Ein Bit wird als kurzer Wellenzug dargestellt, eine Folge von Daten erscheint also als Folge solcher Pulse. Um mehrere verschiedene Ströme gleichzeitig auf einer Glasfaser transportieren zu können, bedient man sich so genannter Multiplextechniken. So lassen sich mehrere Übertragungskanäle durch verschiedene Wellenlängen realisieren, die gemeinsam durch die Glasfaser laufen (und im Grenzfall der linearen Optik sich nicht gegenseitig stören). Dazu kommt das Zeitmultiplexing: Die Bitfolgen werden ineinander verschachtelt, um einen möglichst dichten Datenstrom, also eine hohe Übertragungsrate zu erhalten.

Ein optischer Schalter muss diesen Datenstrom neu sortieren, das heißt, beispielsweise alle Bits des Signals eins auf den Ausgang eins leiten und die von Signal zwei auf Ausgang zwei. Zwar stellt sich die Brechzahl eines SOA nach dem Steuerpuls von selbst wieder zurück, doch dauerte das zu lange. Deshalb manipuliert ein zweiter Puls den anderen ▶

Der optische Halbleiterverstärker

Licht verstärken mit Elektrizität

Im Prinzip ist der *semiconductor optical amplifier* (SOA) eine „abgemagerte“ Laserdiode: Licht wird eingekoppelt und verstärkt, es fehlen aber die spiegelnden Endflächen, die durch Reflexionen für eine Gleichschaltung sorgen, bis nur Licht einer Wellenlänge die Diode verlässt. Wie beim Laser beruht die Verstärkung auf so genannter Besetzungszahlinversion: Elektrisch werden Elektronen von einem niedrigen in einen hohen Energiezustand gehoben (vom Valenz- ins Leitungsband). Von dort kehren sie entweder spontan zurück – und geben die Energiedifferenz in Form von Licht ab – oder werden dazu durch den Einfang eines Lichtquants stimuliert.

Der letztere Prozess bewirkt die Verstärkung des optischen Signals: Für jedes eintreffende Photon verlassen bis zu 1000 den SOA. Ein solcher Halbleiterverstärker ist zudem ein optisch nichtlineares Element, weil eine Änderung der Ladungsträgerdichte die Brechzahl verändert.

Solche Verstärkung gibt es nicht bei dezidierten Wellenlängen wie bei Gaslasern, eine Folge der in Halbleitern zu Bändern überlappenden Energieniveaus. Verstärkung beziehungsweise Gewinn gibt es vielmehr für einen relativ breiten Wellenlängenbereich. Zudem schwächt eine hohe optische Eingangsleistung die Verstärkung. Grund ist die begrenzte Zahl von angeregten Ladungsträgern im Leitungsband. Bei hohem Photonenfluss werden in kurzer Zeit zu viele davon durch stimulierte Emission verbraucht. Der SOA zeigt dann eine Sättigung, bis durch elektrisches Pumpen erneut Elektronen bereit stehen. Diese Erholungszeit ist relativ lang, sodass ein Lichtsignal, das zwischenzeitlich den Halbleiter durchläuft, unterschiedliche Verstärkungen erfährt.

Halbleiterverstärker, sodass die Phasendifferenz zwischen den beiden Teilwellen nun verschwindet – der ursprüngliche Zustand ist wieder hergestellt. Der zeitliche Abstand zwischen beiden Steuerpulsen wird so gewählt, dass das Schalten ungefähr die eingangs geforderte Pikosekunde dauert. Eine solche Komponente lässt sich sehr kompakt auf einem optischen Chip von wenigen Millimetern Abmessungen realisieren.

Mehrere Gruppen in Europa, USA und Japan haben Prototypen davon gebaut. Doch ist die beschriebene Anordnung noch nicht der Weisheit letzter Schluss. Denn sie ist nicht optimal, da Steuerpuls und Datenstrom meist in jenem Wellenlängenbereich liegen, für den der Halbleiterverstärker maximal verstärkt (meist 1550 Nanometer). Somit beeinflusst das informationstragende Signal ebenfalls die entstehende Phasendifferenz und damit den Schaltvorgang.

Die Lösung, die am Heinrich-Hertz-Institut entwickelt wird, basiert auf einem SOA, der bei kürzeren Wellenlängen von 1300 Nanometer optimal verstärkt, von den Bitströmen mit weiterhin 1550 Nanometer deshalb unbeeindruckt bleibt (man spricht von gewinntransparenten SOAs). Damit gelang es, ein optisches Datensignal von 640 Gigabit pro Sekunde, das aus acht Übertragungskanälen beziehungsweise Wellenlängen von jeweils 80 Gigabit pro Sekunde bestand, fehlerfrei zu zerlegen und jeden Übertragungskanal in acht Einzelsignale von jeweils 10 Gigabit pro Sekunde aufzuspalten. Der Schalter ist sogar so schnell, dass man damit ein Signal von außen abtasten kann, um die Qualität der Datenübertragung zu beurteilen.

Optischen Schaltern dürfte die Zukunft der Telekommunikation gehören. Freilich steckt diese Technik noch in ihren Anfängen, während die elektronischen Mittel sehr ausgereift sind. Es wird deshalb zunächst ein Nebeneinander der Techniken geben: Die Optik ermöglicht hohe Transportraten, die Elektronik übernimmt die Steuerung, die Speicherung von Daten und logische Operationen. ■

Klaus-Dieter Linsmeier ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

KUNSTSTOFFE

Ketten knacken leicht gemacht

Manche neuartigen Polymere sind kompostierbar, halten aber dafür nicht so viel aus wie Kunststoffe alter Machart. Ein geschickter Mix löst das Problem.

Von Rolf-Joachim Müller

Ein Kunststoff, der so rasch zerfällt wie Papier? Die Vorstellung wirkt absurd, gelten all die chemischen Verbindungen, deren Name mit „Poly-“ beginnen, doch als extrem robust und beständig. Um der wachsenden Müllberge jedoch Herr zu werden, sind auch exotische Konzepte gefragt. Neue, bioabbaubare Kunststoffe, die kompostierbar sind, könnten einen wichtigen Beitrag zur Lösung dieses Problems bieten. Freilich sollten auch Wegwerfprodukte daraus stabil und reißfest bleiben, solange sie in Gebrauch sind. An unserem Institut wird deshalb versucht, grundlegende Fragen zu klären: Welches Material ist abbaubar, welches warum nicht?

Beständigkeit bewies auch der deutsche Chemiker Hermann Staudinger (1881–1965), der 1922 gegen herrschende Lehrmeinung verkündete, Kautschuk und Zellulose bestünden aus mehr als 1000 kleinen Molekülen, die jeweils über chemische Bindungen miteinander verkettet seien. Trotz zahlreicher Anfeindungen begründete Staudinger die moderne makromolekulare Chemie. Sein Nobelpreis 1953 ehrte auch eine Stoffklasse, die heutzutage in kaum einem Lebensbereich fehlt und die einen großen Teil der heutigen technischen Entwicklungen überhaupt erst möglich gemacht hat.

Die Schattenseiten sind mittlerweile bekannt: Nach Angabe des Umweltbundesamtes mussten 1997 allein in Deutschland etwa 3,2 Millionen Tonnen verschiedener Kunststoffe entsorgt werden. Ungefähr 60 Prozent der Abfälle werden derzeit „recycelt“ oder zur Energiegewinnung genutzt, der Rest deponiert oder verbrannt.

Sowohl der Sinn des Kunststoffrecyclings als auch die Müllverbrennung sind Gegenstand heftiger Diskussionen; für bestimmte Bereiche bietet sich nun die

So vergänglich kann Kunststoff sein: Zerfall einer Folie aus bioabbaubarem Kunststoff (Ecoflex®) während einer Kompostierung.

GBF





Kompostierung spezieller Kunststoffe als Alternative an. Wer vom biologischen Abbau spricht, lobt das Werk von Mikroorganismen. Sie scheiden Enzyme aus, die lange Polymerketten zunächst in kurze, wasserlösliche Bruchstücke zerschneiden. Diese lassen sich dann durch die Zellmembranen ins Innere der Organismen befördern und dort weiter verarbeiten. Dabei entstehen Energie und Rohstoffe für den Aufbau der Zellen, als Abfallprodukte Wasser, Kohlendioxid und gegebenenfalls Methan.

Doch viele Polymere widersetzen sich der Enzymattacke. Bestehen ihre Ketten aus reinem Kohlenstoff, wie etwa in Polyethylen und in Polystyrol, finden die Biokatalysatoren keine Angriffsmöglichkeiten. Der Grund: Da solche Polymere in der Natur nicht vorkommen, haben sich keine geeigneten Enzymsysteme entwickelt. Werden die Kohlenstoffketten jedoch durch andere Atome wie Sauerstoff oder Stickstoff unterbrochen, sieht die Sache anders aus. Kein Wunder, denn auch natürliche Polymere wie Stärke, Zellulose oder Proteine besitzen solche „Heteroatome“ in den Polymerketten. Dementsprechend enthalten die meisten heutigen bioabbaubaren Werkstoffe Ether-, Urethan-, Amid- oder Estergruppen (siehe Grafik unten). Enzyme beschleunigen den Einschub von Wassermolekülen in diese Bindungen, die dann unter Bildung etwa von Säure-, Alkohol- oder Aminogruppen gespalten werden.

Mobile Ketten

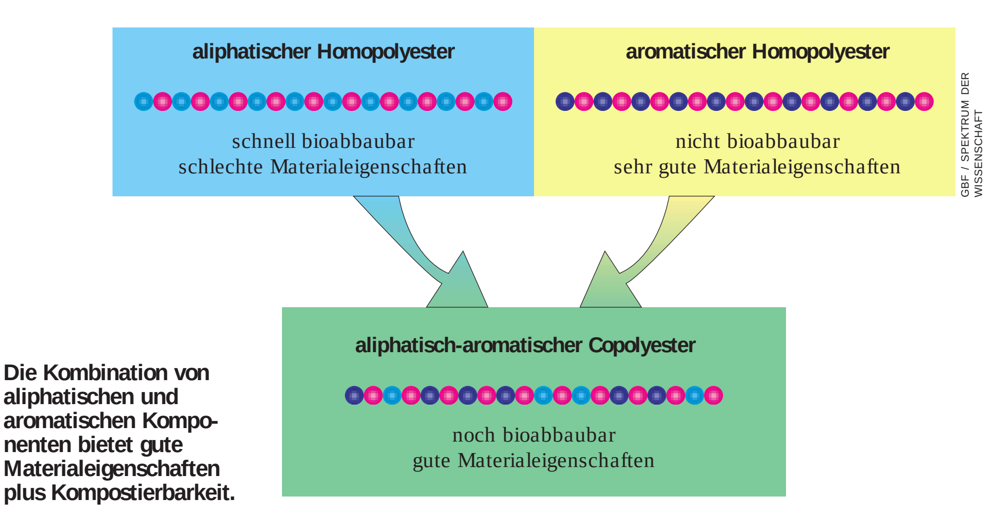
Dennoch gibt es als bioabbaubar vermarktete Kunststoffe wie Polyethylen und Polystyrol mit reinen Kohlenstoffketten. Der Trick dabei: Besondere Zusätze oder der Einbau spezieller Gruppen in die Ketten sollen die Aufgabe der Enzyme übernehmen und die langen Moleküle beispielsweise unter Sonnenlicht zunächst chemisch in Fragmente auftrennen. Ob diese Reaktionen aber ausreichen, um den Mikroorganismen das Feld für den weiteren Abbau der Bruchstücke zu bereiten, darüber streiten die Gelehrten.

Fremdatome in den Ketten garantieren überdies allein noch keine Bioabbaubarkeit. Auch die Flexibilität der Polymerketten und ihr Zusammenhalt untereinander im Werkstoff spielen eine wichtige Rolle. Denn nur ausreichend mobile und flexible Ketten können sich in das katalytisch aktive Zentrum der Enzyme einpassen und werden dann gespalten. Dazu ein Beispiel: Starre Polyester aus ringförmigen Einzelmolekülen (so genannten Aromaten) wie das für Trinkflaschen verwendete Polyethylenterephthalat (PET) bleiben vom mikrobiellen Angriff unbeeindruckt, flexible Polyester aus linearen Bausteinen (so genannten Aliphaten) wie Polycaprolacton (PCL) hingegen sind abbaubar. Letzteres wird konventionell als Ausgangsmaterial für Polyurethane oder als Zuschlagstoff für Polyolefine verwendet. Ein weiteres Beispiel für den Einfluss der Kräfte zwischen den Polymerketten auf den biologischen Abbau sind Polyamide. Zwar beruhen natürliche Eiweiße und technische Polyamide wie Nylon beide auf den erwähnten Amid-Bindungen, doch verhindern bei den technischen Produkten starke Wasserstoffbrücken zwischen den Polymerketten eine enzymatische Spaltung.

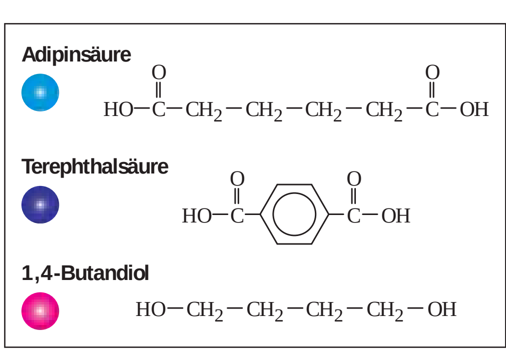
Als wäre die Angelegenheit nicht schon kompliziert genug, bedürfen auch die Fragmente, die bei der Spaltung der Polymerketten entstehen, noch der Beachtung. Da sie sich in Wasser lösen, könnten sie beispielsweise ins Grundwasser gelangen. Dann muss garantiert sein, dass Mikroben sie weiter zersetzen werden, dass sie nicht giftig wirken und sich wohlmöglich in Nahrungsmitteln anreichern (bislang gilt aber nur die Bildung von aromatischen Diaminen aus aromatischen Polyamid-Strukturen als bedenklich).

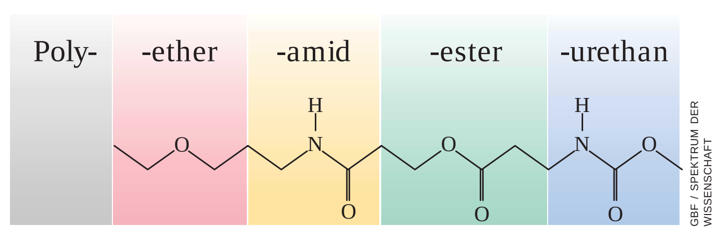
Darüber hinaus müssen sich die Verarbeitungs- und Anwendungseigenschaften mit denen konventioneller Kunststoffe messen lassen. Beispielsweise haben natürliche Polymere wie Zellulose oder Stärke diesbezüglich deutliche Defizite. Chemische Modifizierung hilft zwar in gewissem Maße, doch nimmt die Abbaubarkeit dabei ab (beispielsweise beruht das unter dem Markennamen „Bioceta“ für bioabbaubare Hüllen von Friedhofskerzen verwendete Material auf teilweiser Veresterung von OH-Gruppen zu Zelluloseazetat). Aber auch rein synthetische bioabbaubare Kunststoffe erreichen bislang nicht die Eigenschaften konventioneller Materialien – PCL schmilzt bei nur 60 Grad Celsius, während Polyethylen eine doppelt so hohe Temperatur aushält.

Verschiedenen Arbeitsgruppen, darunter auch unserer, ist es jüngst gelungen, die Abbaubarkeit aliphatischer Polyester mit den hervorragenden Eigenschaften aromatischer Polyester zu ver- ▶



Die Kombination von aliphatischen und aromatischen Komponenten bietet gute Materialeigenschaften plus Kompostierbarkeit.





Fremdatome in der Kette bieten Angriffsflächen für Enzyme.

binden. In den Polymerketten wechseln sich dabei aliphatische und aromatische Esterbindungen statistisch ab. So entstehen bioabbaubare Kunststoffe, deren Eigenschaften denen von Polyethylen vergleichbar sind. Wir konnten auch sicherstellen, dass nicht nur die aliphatischen Komponenten von Enzymen angegriffen, sondern auch alle aromatischen Bereiche der bioabbaubaren aliphatisch-aromatischen Copolyester von den Mikroorganismen verstoffwechselt werden; umweltgefährdende Zwischenprodukte treten dabei nicht auf

Aktuelles Anwendungsziel bioabbaubarer Kunststoffe sind hauptsächlich Produkte mit kurzer Gebrauchsdauer wie etwa Lebensmittelverpackungen oder Hygieneartikel (beispielsweise Wischtücher oder Windeln). Während des Gebrauchs in normaler Umgebung tritt kein nennenswerter Abbau auf. Dieser beginnt erst während der Kompostierung durch die dort vorhandenen Mikroorganismen bei geeigneter Temperatur – die in Heimkompostmieten in der Regel nicht erreicht werden – und optimaler Feuchte. Lohnende Anwendungen bietet auch der Agrarbereich: Bioabbaubare Mulchfolien können einfach untergepflügt werden, Pflanzenschutzmittel lassen sich in Kunststoff einschließen und werden dann langsam während der Vegetationsperiode freigesetzt.

Der nächste Schritt, an dem wir und andere Gruppen arbeiten, sind Kunststoffe, die sich vollkommen in natürliche Stoffkreisläufe einfügen. Dies setzt voraus, dass zukünftig ausschließlich nachwachsende Rohstoffe, etwa Komponenten aus Stärke oder Zucker, ihre Basis bilden, und keine Produkte der Petrochemie mehr verwendet werden. ■

Der promovierte Chemiker **Rolf-Joachim Müller** *leitet die Gruppe „Bioabbaubare Polymere“ bei der Gesellschaft für Biotechnologische Forschung mbH (GBF) in Braunschweig.*

TECHNOGRAMM

LUFTFAHRT

Keiner mag Shimmy

Mit quietschenden Reifen setzt ein Flugzeug auf der Landebahn auf – Alltag auf den Flughäfen dieser Welt. Wenn eine Boeing 737 oder ein anderes kleineres Flugzeug mit mehr als 200 Kilometern pro Stunde den Asphalt berühren, haben Fahrwerk und Reifen einiges auszuhalten: Mehr als 20 Tonnen Last auf einem einzigen Rad lassen die Reifen flattern. Dieses Englisch „Shimmy“ genannte Phänomen wird durch spezielle Konstruktionen gedämpft. Der Ingenieur Igo Besselink von der Abteilung Fahrzeugdynamik der niederländischen Forschungsorganisation TNO hat es jetzt mathematisch modelliert und in Simulationen herausgefunden, dass es auch ohne spezielle Dämpfer geht, wenn nur die Geometrie und Steifigkeit des Fahrwerks optimiert wird. Vorteile: 10 bis 20 Kilogramm weniger Gewicht, reduzierte Fertigungskosten und vor allem: die aufwendige Wartung der Dämpfer entfiele.



Reifenspuren auf der Landebahn verraten: Shimmy was here.

TNO AUTOMOTIVE

NAHVERKEHR

Im Minutentakt über der Autobahn

Mit der Technik von heute die Verkehrsprobleme von morgen lösen – das will ein Ingenieurbüro in Rösrath bei Köln. Beton-Hohlrohrstützen sollen Schienenwege tragen, in die elektrisch angetriebene Kabinenbahnen seitlich eingehängt auf Reifen mit geringem Rollwiderstand entlang laufen. Magnetschwebetechnik wäre nachrüstbar. Der große Vorteil: Diese Verkehrswege können beispielsweise auf dem Mittelstreifen von Autobahnen stehen, teurer Grunderwerb entfällt. Der Bau ließe sich ohne Beeinträchtigung des Autoverkehrs gestalten. Ein- und Ausstieg erfolgt an Zwischenstationen, mit Hilfe von Shuttles am Ende eines Zugs sogar ohne Verlangsamen der Fahrt. Ob dieses Konzept realisierbar ist und zu welchen Kosten, sollen weitere Studien zeigen.



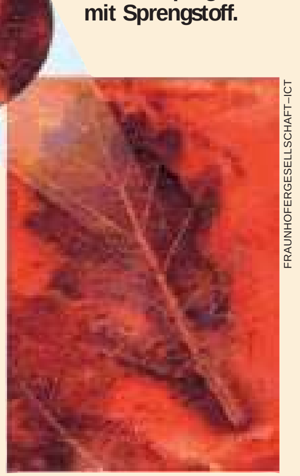
Neues Konzept: Mit der Hochbahn von Stadt zu Stadt

INGENIEURBURO WOERZBERGER

OBERFLÄCHEN

Neue Disziplin: Kunstsprengen

Normalerweise verbindet man mit Sprengstoff einen Akt der Zerstörung: Häuser zerfallen zu Staub oder ein Loch öffnet sich im Berg. Doch die Druckwelle einer Sprengung kann auch äußerst filigrane Strukturen hervorbringen. Mitarbeiter des Fraunhofer-Instituts für Chemische Technologie in Pfinztal haben daraus ein Verfahren zur Strukturierung von Metalloberflächen entwickelt. Auf eine Metallplatte legten sie ein Eichenblatt und bedeckten es mit einer dünnen Folie aus einem Nitrozellulose-Sprengstoff; deren Lackschicht verhindert das Verdampfen des explosiven Materials. Bei Zündung entstand eine Druckwelle von 150–200 Kilobar, das Blatt verdampfte, seine Struktur prägte sich in die Metalloberfläche. Die nützliche Nebenwirkung: Die Sprengung verdichtet und härtet sie. Das Verfahren eignet sich unter anderem für Stahl, Aluminium, Kupfer und Messing, wobei die Dicke der Sprengfolie zwischen 0,8 bis 3 Millimeter variiert. Der detailgenaue Abdruck kann auch als Vorlage zur dekorativen Verzierung von Kunststoffoberflächen dienen.



Schöner prägen mit Sprengstoff.

FRAUNHOFERGESELLSCHAFT–ICT

SPORTGERÄTE

Fersenstoß und Abrollhilfe

Manche Gestalt moderner Sportschuhe beruht mehr auf Vorurteilen über den Laufvorgang denn auf wissenschaftlichen Erkenntnissen.

Von Karen Wright

Eigentlich ist das Laufen eine recht simple Sportart, denn zwei Beine und ein gesundes Herz reichen dafür aus. Oder etwa nicht? Wer zum ersten Mal ein Fachgeschäft aufsucht, um sich mit einem geeigneten Schuh auszustatten, erkennt schnell, dass er oder sie dabei an die Pforten einer Geheimwissenschaft geklopft hat. Der richtige Laufschuh orientiert sich beispielsweise an Geschlecht, Gewicht und bevorzugtem Untergrund – Asphalt oder Wald? Dazu kommen Fragen der jeweiligen Lauftechnik und der Ambitionen: Hobbysportler versuchen sich durch Dämpfung und Gelenkunterstützung vor Verletzungen zu schützen, Profis wählen Schuhe, die ihnen Zehntelsekunden schenken.

Wie nun ein solcher Sportartikel optimal zu gestalten sei, beschäftigt Wissenschaftler etwa seit Beginn der 70er Jahre, als nämlich der *sneaker*, ein leichter Segeltuchsportschuh weltweit zum Renner wurde. Doch trotz millionenschwerer Investitionen der Industrie bieten die komplexen biomechanischen Zusammenhänge beim Laufen immer noch Überraschungen.

Steifere Sohlen und ebensolche Unterstützungen des Fußgewölbes sollen dem Fuß im Schuh Halt geben und seinen Kontakt mit dem Boden führen, freilich ohne die komplexe Folge von Teilbewegungen des Gangzyklus zu stören. Viele Produkte haben dazu eine Zwischensohle aus Kunststoff zwischen der äußeren und inneren Sohle, die unter dem Fußgewölbe fester ist als an der äußeren Seite des Schuhs. Diese Unterstützung soll den Fuß davor bewahren, zu stark einwärts zu rollen (fachlich: zu pronieren), wenn sich das Gewicht des Läufers von der Ferse zur Fußspitze verlagert.

CONVERSE INC.

Allerdings ist eine gewisse Pronation natürlich und beim normalen Gehen und Laufen sogar notwendig. Nachdem Anfang der 80er Jahre diese Zwischensohle üblich wurde, verzeichneten Sportärzte drastisch mehr Reizungen des *tractus tibialis*, einem bindegewebigen Band, das außen am Oberschenkel entlang verläuft. Läufer mit einer normalen Pronation rollten auf Grund der Gewölbestütze vermutlich zu weit auf den äußeren Fußrand (Supination), das iliotibiale Band wurde gestrafft, der Oberschenkelknochen einwärts gedreht und so die Reibung zwischen dem Band und einem knöchernen Höcker im Bereich des Knies verstärkt.

In großen Schritten zum modernen Laufschuh

In jener Zeit kamen auch Luftkissen, Silikon-Gel oder polymere Schäume auf, die den Aufprall der Ferse auf dem Boden dämpfen sollten. Das Ergebnis: immer mehr Entzündungen der Achillessehnen. „Der Fuß sinkt ein und verdreht sich, der gedämpfte Schuh kann ihn nicht mehr führen und die Gelenke stabilisieren“, erläutert Jack Taunton, Vize-Direktor am sportmedizinischen Zentrum Allan McGavin der Universität von British Columbia.

Stabilität und Dämpfung markieren zwei Eckpunkte der Schuhentwicklung, zwischen denen die Industrie Kompromisse sucht. Ein weiterer ist das Gewicht: Je leichter ein Schuh, desto weniger Energie muss der Läufer aufwenden, aber desto problematischer ist es wiederum, die Forderungen nach Stabilität und Dämpfung zu berücksichtigen. Seitdem Leder und Segeltuch durch Nylon ersetzt wurden und polymere Schäume (Ethylenvinylacetat, EVA) die Funktion des Gummis in der Zwischensohle und im Absatz übernahmen, ist es nicht einfach, Schuhe leichter zu machen. Meist versuchen die Konstrukteure, Stabilitätskomponenten wie die Zwischensohle nicht aus massivem Material sondern gitterartigen Strukturen zu fertigen.

NIKE INC.

Biomechanische Forschung sollte diese Entwicklungen der Industrie begleiten und ihr neue Wege zeigen. Doch mitunter stehen die Erkenntnisse der Wissenschaftler im Widerspruch zu langjährigen Überzeugungen, die sich sozusagen in millionenschweren Investitionen materialisiert haben. Benno M. Nigg, Direktor des „Human Performance Laboratory“ an der Universität Calgary, zweifelt beispielsweise an dem so sicher geglaubten Zusammenhang von Aufprallkräften und Laufverletzungen. Untersuchungen seiner Gruppe zeigten, dass schnelle Läufer zwar mit zwei- bis dreimal höherer Belastung landen als langsamere, aber keineswegs häufiger verletzt sind. Andere Institute haben laut Nigg entdeckt, dass das Laufen auf hartem Untergrund nicht schädlicher ist als das auf weichem. Er erklärt das mit dem Anstieg von Knochenmasse und -dichte bei gelenkbelastenden Sportarten wie Laufen oder Basketball im Vergleich etwa zum Schwimmen. Das Paradigma des „Dämpfens“, um die Häufigkeit oder die Art von Laufverletzungen zu verrin- ▶

gern, muss seiner Meinung nach hinterfragt werden.

Wie kann man aber dann die Verletzungen erklären, die bis zu zwei Drittel der Läufer jährlich erleiden? Und warum sind gedämpfte Schuhe bequemer als steife? Nigg erklärt dies mit einem neuen Modell: Beim Auftreffen der Ferse auf den Boden entstünden schädliche Schwingungen im Bindegewebe. Der Körper versucht dem durch Anspannen der Muskulatur unmittelbar vor dem Bodenkontakt entgegenzuwirken. Die Dämpfungsmechanismen in Laufschuhen können ihn dabei unterstützen, indem sie die beim Aufprall entstehenden Frequenzen verschieben. Wie eine gestimmte Gitarrensaite hat auch das Weichteilgewebe eine bestimmte, von Körper zu Körper verschiedene und sich mit dem Muskeltonus ändernde Resonanzfrequenz, bei der es besonders stark mitschwingt. Stimmt die anregende Schwingung damit nicht überein, gibt es sich unberührt.

Kein Wunder also, dass Läufer ihren speziellen Schuhtyp bevorzugen. Nigg glaubt, dass Ermüdung und Verletzungen entstehen können, wenn die Muskeln zu viel Energie benötigen, um der Weichgeweberesonanz entgegenzuwirken. Der richtige Schuh vermag die Leistung um bis zu fünf Prozent zu steigern – das reduziert die Zeit beim Marathonlauf um etwa acht Minuten.

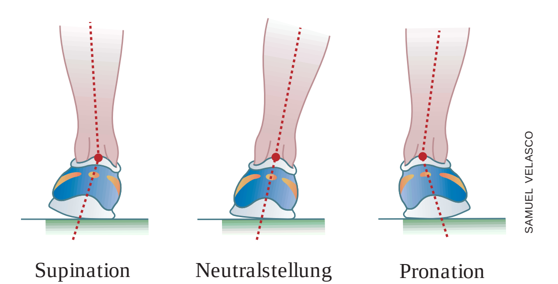
Der Marathonläufer und Biomechaniker Peter Cavanagh von der Pennsylvania State University hatte bereits 1980 am gängigen Modell für den Bodenkontakt gerüttelt: Ein Läufer landet demnach auf der Ferse, schiebt sich über seinen Spann nach vorne und drückt sich vom vorderen Teil des Fußes wieder ab. Der Aufprall mit den damit verbundenen Stoßeinwirkungen galt, wie schon erwähnt, als besonders verletzungsträchtig. Cavanagh ließ eine Kraftmessplatte in eine Teststrecke ein, um Ort und Stärke der an der Fußsohle ansetzenden Kräfte vom Aufsetzen der Ferse bis zum Abdruck von den Zehen zu quantifizieren. Die Ergebnisse waren überraschend. Selbstverständlich landeten die Meisten tatsächlich auf der Ferse, allerdings eher auf ihrem äußeren Rand. Andere, die mit der gleichen Geschwindigkeit unterwegs waren, kamen auf dem Rist auf und eine dritte Gruppe landete von vornherein etwa im ersten Drittel des Vorderfußes. Die Gruppen erhielten die Bezeichnungen Hinter-, Mittel-, und Vorderfußläufer; innerhalb jeder Gruppe fand Cavanagh eine Vielzahl von Bodenkontaktmustern.

Die Biomechanik des Laufens war offensichtlich viel komplexer und individuell unterschiedlicher als erwartet. Der Wissenschaftler fand sogar heraus, dass die Kräfte, die während des Abdrucks auf den vorderen Teil des Fußes wirken, mehrere Male größer sein können als die, die beim Aufsetzen mit der Ferse entstehen. Heutige Laufschuhe sind immerhin meist von der Ferse bis zur Spitze gepolstert, dennoch widmen Schuhhersteller dem Vorderfuß weniger Aufmerksamkeit. Oft fehlt es auch an der fachlichen Information. So entwickelten sie Anfang der 80er Jahre die so genannte Abrollhilfe – eine leichte Aufwärtskrümmung der vorderen Sohle. Der Laufschritt solle dadurch effizienter werden, weil ein natürliches Vorwärtsschieben zum vorderen Teil des Schuhs erfolge. Bewiesen wurde diese These nicht, im Gegenteil: Darren Stefanyshyn, ein Kollege Niggs, fand kürzlich heraus, dass Abrollhilfen die Vorwärtsbewegung sogar negativ beeinflussen, da sie die Zehen und Ballen daran hindern, mit voller Kraft abzustoßen. Und Nigg konstruierte einen Schuh ohne Abrollhilfe und verhalf damit Durchschnittsläufern zu 2/10 Sekunden schnelleren Sprints. Da er eng mit dem Sportschuhhersteller Adidas zusammenarbeitet, dürften seine Forschungen wohl neue Produkte inspirieren.

Auch die heute üblichen Pronationsstützen stehen neuerdings in der Diskussion. Am Nike Forschungslabor in Beaverton (Oregon) bezweifeln Wissenschaftler den Nutzen starrer Zwischensohlen und fester Pronationsstützen. „Solche Teile stoppen das natürliche Einwärtsrollen des Fußes abrupt wie eine Backsteinmauer“, sagt der Direktor des



Der Nike Air Structure Triaxx 5, ein aktueller, typischer Laufschuh, enthält eine Zwischensohle mit zwei unterschiedlichen Härtegraden und andere Komponenten, die stabilisieren und dämpfen sollen.



Ein Vergleich dreier Läufer während der mittleren Phase eines Schrittes, bei dem sie entweder mit der Außenseite des Fußes (Supination), der gesamten Fußfläche (Neutrallage) oder der Innenseite des Schuhs aufsetzen (Pronation).

Labors, Mario Lafortune. Er stützt sich dabei auf Cavanaghs Forschungen, wonach eine gewisse Pronation normal und sogar notwendig ist, um das Gewicht vom äußeren Rand des Fußes, auf dem die meisten Läufer landen, zur Mittellinie des Fußes hin zu verlagern.

Lafortune und seine Kollegen versuchen daher die Pronation nur zu verlangsamen. Dazu reichen einfache Modifikationen an derzeitigen Produkten. So lässt sich das Bruch-Polster am äußeren Rand der Ferse weicher ausführen und damit leichter zusammendrücken. Der Fuß wird dann nicht plötzlich aus seiner Landeposition gerissen. Ähnlich wirkt es, die Zwischensohle im hinteren Drittel des Schuhs zu verdünnen und zum äußeren Rand hin abzurunden. Nike hat diese Veränderungen bei einigen Modellen bereits vorgenommen. Asics brachte ebenfalls schon einen Schuh mit einer verlangsamten Pronation heraus.

Barfuß läuft sich's besser

Lafortunes Gruppe sucht darüber hinaus nach Möglichkeiten, die natürliche Steifheit des Fußes zu verbessern. Beim Barfußlaufen unterstützt sie der so genannte Ankerwindenmechanismus, das sind bindegewebige Bänder zwischen Ferse und Zehenwurzel, die sich anspannen, sobald die Zehen während des Abdrucks gebeugt werden. Das blockiert die langen Knochen des Fußes, vertieft dessen Gewölbe und zentriert den Fuß vor dem Abdruck. Nach Lafortunes Meinung erzeugt ein sowohl steifer als auch zentrierter Fuß den sichersten und effizientesten Vortrieb. Es sei immer noch am besten, den Fuß sich selbst stabilisieren zu lassen, anstatt die Stabilität durch äußere, rigide Elemente zu erzeugen. Der Wissenschaftler äußert sich natürlich nicht darüber, wie sein Arbeitgeber diesen Mechanismus in künftigen Designs auszunutzen versucht. Vermutlich wird aber ein weicheres und flexibleres Vorderteil kommen.

Die Vorteile des Barfußlaufens stellt auch Nigg heraus. Er vertritt die Auffassung, dass jeder Körper ein bevorzugtes Bewegungsmuster aufweist, das sich beim Barfußlaufen erkennen lässt und an dem er trotz orthopädischer Intervention festhält. Sobald Schuhe dieses Muster fördern, fühlt man sich in ihnen großartig und ist leistungsstärker; wenn sie jedoch dagegen arbeiten, können sie den Läufer stören und ermüden. Darin scheinen immer mehr Biomechaniker und Entwickler übereinzustimmen: Es gibt keine Idealform des Laufens und keine systematische Verbesserungsstrategie, die für alle Läufer gilt. Nike hat deshalb angekündigt, seine Schuhmodelle stärker zu klassifizieren, um die individuelle Wahl zu erleichtern. Das Unternehmen empfiehlt seinen Händlern sogar, biomechanische Analysen durchzuführen, um den persönlichen Laufstil eines Kunden genau zu charakterisieren. Keiner für alle, aber alle Möglichkeiten für einen, das soll die Devise sein. ■

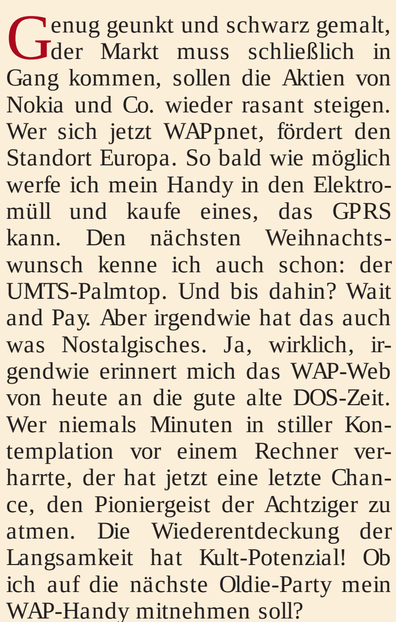
Karen Wright arbeitet als freie Wissenschaftsjournalistin in den USA.

AM RANDE

WAP statt Web

Oder: Die Wiederentdeckung der Langsamkeit

Nun habe ich mich mühsam daran gewöhnt, meine Unterwäsche via World Wide Web bei Yahoo zu ersteigern und das Fernsehprogramm online abzufragen, doch wenn ich nicht aufpasse, überrollt mich der nächste Trend: In drei Jahren sollen 200 Millionen Europäer via Handy oder Palmtop im Internet surfen, vom PC aus nur halb so viele. Da hilft jetzt nichts: WAP statt Web lautet nun die Devise.



Aber das ist hart. Das Akronym steht eigentlich für „Wireless Application Protocol“, ein Standard für die Übertragung von Internet-Seiten in drahtlosen Netzwerken. Dass es gern als „Wait and Pay“ übersetzt wird, liegt an der momentanen Übertragungsrate von 9,6 Kilobit pro Sekunde. Da bleiben vor allem die schönen Bilder und Werbebanner auf der Strecke – wie soll ich nun wissen, was ich kaufen will? Und dann dauert es und dauert es und kostet es und kostet es. WAP, das heißt derzeit: Surfen auf der Standspur.

Aber bald wird alles besser, dann klappt das auch mit den Unterhosen und Musikdateien und Videos und vielem mehr. Dafür investieren Mobilfunkbetreiber etliche Milliarden. Sie beschleunigen die Datenraten mit weiteren Kürzeln: UMTS, GPRS, EDGE. Das sind wohlklingende Techniken, die Informationsströme in den mobilen Netzen schneller fließen lassen sollen. Sie werden die Wirtschaft ankurbeln, und das kommt letztlich jedem von uns zugute. Denn aus E-Commerce wird M-Commerce, die mobile, wachstumsfördernde Geldverschiebe-Maschine.

Die Antenne am Ohr lockert nämlich die Geldbörse. Ein Gebührchen hier, eine winzige Abbuchung dort – alles kein Problem. Wäre da nicht eine Sicherheitslücke: Verschlüsselte Daten etwa für die Abbuchung durch den Pizza-Service müssen auf einem WAP-Server neu chiffriert werden und liegen dann für Bruchteile einer Sekunde offen. Diese Lücke sei bloß einem Loch von einem Zentimeter Durchmesser in einer hundert Meter langen Mauer vergleichbar, beruhigen Interessenvertreter. Das müsse ein Schurke erst einmal finden. Ein solcher ist, wer nun an spannende Gucklöcher seiner Jugendzeit denkt.

Genug geunkt und schwarz gemalt, der Markt muss schließlich in Gang kommen, sollen die Aktien von Nokia und Co. wieder rasant steigen. Wer sich jetzt WAPpnet, fördert den Standort Europa. So bald wie möglich werfe ich mein Handy in den Elektromüll und kaufe eines, das GPRS kann. Den nächsten Weihnachtswunsch kenne ich auch schon: der UMTS-Palmtop. Und bis dahin? Wait and Pay. Aber irgendwie hat das auch was Nostalgisches. Ja, wirklich, irgendwie erinnert mich das WAP-Web von heute an die gute alte DOS-Zeit. Wer niemals Minuten in stiller Kontemplation vor einem Rechner verharrte, der hat jetzt eine letzte Chance, den Pioniergeist der Achtziger zu atmen. Die Wiederentdeckung der Langsamkeit hat Kult-Potenzial! Ob ich auf die nächste Oldie-Party mein WAP-Handy mitnehmen soll?

Klaus-Dieter Linsmeier

LAWINENFORSCHUNG

Wenn Schnee schwach wird

Das Idyll verschneiter Berghänge kann sich innerhalb weniger Sekunden in ein tödliches Inferno verwandeln, wenn Schneemassen losbrechen und donnernd zu Tal stürzen.

Von Anja Schilling

Jeden Winter kommen im Alpenraum einige Dutzend Menschen durch Lawinen zu Tode. Oftmals trifft es Ski- oder Snowboardfahrer, die abseits der präparierten Pisten ihrem Freizeitvergnügen nachgehen. Doch gelegentlich rasen die Schneemassen bis in besiedelte Gebiete hinein, wo sie immensen Schaden anrichten – wie etwa im Februar 1999, als bei einem der schwersten Lawinenunglücke im österreichischen Galtür mehrere Häuser zerstört wurden und 38 Menschen ums Leben kamen. Im selben Monat rissen Lawinen bei Chamonix in den französischen Alpen und bei Evolène im Wallis weitere 23 Personen in den Tod.

Mag bei vielen dieser Katastrophen Leichtsinn oder Unbedachtheit im Spiel sein, so lassen sich Lawinenabgänge als solche doch kaum vermeiden – sie gehören im alpinen Winter quasi zum Alltag. Aber das Wissen um ihre Ursachen kann das Verständnis für dieses Naturphänomen und die Risikowahrnehmung in „riskanten“ Situationen verbessern.

Nüchtern betrachtet ist Schnee eine feste Form des Niederschlags, die sich aus Eiskristallen in komplexen hexagonalen Formen zusammensetzt. Frisch gefallen, besteht er aus einem locker verzahnten Gerüst von Schneekristallen mit hohem Luftgehalt. Dass dies nicht lange so bleibt, dafür sorgt eine Reihe von Umwandlungsprozessen, die durch die Witterungsbedingungen verursacht werden.

Eine der maßgebenden Größen ist die Temperatur in der Schneedecke. Am Erdboden liegt sie üblicherweise um den Gefrierpunkt, während ihr Wert an der Oberfläche des Schnees von den Verhältnissen in den darüber liegenden Luftschichten bestimmt wird. Mittelfristige Temperaturänderungen der Atmosphäre setzen sich im Schnee nur bis in 30 bis 50 Zentimeter Tiefe merklich durch, Tagesschwankungen beeinflussen sogar nur die obersten zehn Zentimeter. Dadurch entsteht in der oberen Schneedecke ein Temperaturgradient, sodass benachbarte Schneekörner unterschiedliche Temperaturen und somit auch unterschiedliche Dampfdrucke aufweisen, was die Metamorphose entscheidend beeinflusst.

Von der Schneeflocke zum Schwimmschnee

Neuschneekristalle haben im Verhältnis zu ihrer Masse eine sehr große Oberfläche. An den Spitzen der hexagonalen Schneesterne, wo der Dampfdruck höher ist, sublimiert das gefrorene Wasser zu Dampf, der im Zentrum des Kristalls wieder angelagert wird. Dadurch werden die Verästelungen kürzer und die Mitte dicker, sodass sich die Schneeflocke der Kugelform annähert. Der Neuschnee wandelt sich so über ein filziges Zwischenstadium zu körnigem Altschnee mit abgerundeten Formen um, deren Durchmesser kleiner als 0,5 Millimeter ist. Dieser Vorgang findet bei einem kleinen Temperaturgradienten in der Schneedecke von weniger als 5 Grad Celsius pro Meter statt und wird – wegen der Verkleinerung der Formen – „abbauende Umwandlung“ genannt.

Größere Temperaturgradienten haben im Gegensatz dazu eine „aufbauende Umwandlung“ zur Folge – die Schneekristalle vergrößern sich. Denn dann steigt wärmere Luft aus der bodennahen Schicht mit dem dort sublimierten Wasserdampf in obere, deutlich kältere Schneeschichten auf, wo der Dampf an den kalten Körnern ankristallisiert. Je größer die Temperaturunterschiede zwischen den Kristallen, desto größer ist das Wachstum in den oberen Schichten, wobei Korngrößen bis 5 Millimeter erreicht werden. Bei andauernder aufbauender Umwandlung wachsen becherartige Hohlformen, so genannte Becherkristalle. Durch sie nimmt die Zahl der Kornbindungen pro Volumen ab, was die Festigkeit der Schneeschicht deutlich verringert. In bodennahen Schichten entsteht dadurch Schwimmschnee oder Tiefenreif. Geschieht die aufbauende Umwandlung oberflächennah und dies besonders in Schattenlagen, wird der Schnee griesig. So entstehen schwache, wenig belastbare Schneeschichten.

Die Übergänge zwischen aufbauender und abbauender Umwandlung, die beide bei Minusgraden stattfinden, sind fließend und jederzeit möglich. Doch gibt es noch eine dritte Umwandlungsform bei einer Erwärmung auf null Grad Celsius, die „Nassschneemetamorpho-



ABBILDUNGEN: EIDGENÖSSISCHES INSTITUT FÜR SCHNEE- UND LAWINENFORSCHUNG, DAVOS

Entwicklung einer künstlich ausgelösten Lawine im Versuchsgelände Vallée de la Sionne des Eidgenössischen Instituts für Schnee- und Lawinenforschung

se“. Durch Antauen bildet sich ein Schmelzwasserfilm an den Körnern. Hohlformen werden von Wasser ausgefüllt, und es entstehen Rundformen mit einem Durchmesser von mehr als einem Millimeter. Da zwischen den Körnern nun anstelle fester Eisbindungen nur mehr ein Wasserfilm existiert, sinkt die Festigkeit des Schnees erheblich. Zusätzlich bildet Schmelzwasser, das sich an undurchlässigen Schneeschichten oder am Boden sammelt, eine Schmierschicht, auf welcher der darüber liegende Schnee abgleiten kann.

Schwachstellen der Schneedecke

Schneefälle im Gebirge sind fast immer von starken Winden begleitet. Auch ohne Niederschlag wird lockerer Neuschnee ab Windgeschwindigkeiten von etwa vier Metern pro Sekunde verfrachtet, festerer Schnee ab ungefähr zehn Metern pro Sekunde. Die pro Zeiteinheit vom Wind transportierte Schneemenge nimmt mit der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit zu. Verdoppelt sich also die Windgeschwindigkeit, steigt die Verfrachtungsrate auf das Achtfache! Die Schneepartikel werden beim Transport zertrümmert und lagern sich dann an windgeschützten Stellen wieder ab, wie etwa an den Leeseiten von Hängen oder in Mulden. Die jetzt kleinen Partikel bilden Schneeschichten, die weich, aber zugleich spröde sind. Ihre Dichte ist zwei- bis viermal so groß wie diejenige von ungestört abgelagertem Schnee. Auf weniger dichten Schneeschichten oder auf harten Harschschichten aufgehäuft, bilden sie vielfach die Basis für eine Lawine.

Eine Schneedecke ist nicht homogen, sondern enthält eine komplexe Abfolge von Schichten, die unter verschiedensten Bedingungen entstanden sind. Die Schichtgrenzen bilden dabei oft die Schwachstellen. Im Wesentlichen bestimmen drei Faktoren das weitere Geschehen: die Dichte, die Verformbarkeit und die Festigkeit des Schnees.

- Die Dichte bestimmt das Gewicht der Schneedecke und folglich – zusammen mit anderen Faktoren wie etwa der Hangneigung – die wirkenden Kräfte. Ihre Werte reichen von etwa 30 Gramm pro Kubikzentimeter bei leichtestem Neuschnee (dem so genannten Wildschnee) bis zu mehr als 500 Gramm pro Kubikzentimeter bei Firn. Die Dichte einer Schneeablagerung nimmt unter anderem infolge des Druckes der überlagernden Schichten mit der Zeit zu.
- Die Verformbarkeit des Schnees, der sich wie eine zähe Flüssigkeit verhält, ist besonders groß, wenn die Dichte klein ist und die Temperatur nahe beim Gefrierpunkt liegt.
- Die Festigkeit hängt ab von Art, Temperatur und Feuchte des Schnees sowie von der Geschwindigkeit und der Art der Belastung. Stark vereinfacht bewirken runde, kleine Formen mit großer Dichte bei tiefen Temperaturen und geringer Feuchte eine große Festigkeit. Die tatsächliche Festigkeit lässt sich aber nur aus der jeweiligen Kombination aller Faktoren bestimmen. So kann eine anfängliche Erwärmung zunächst die Festigkeit vermindern. Gleichzeitig erhöht sich jedoch die Verformbarkeit, was eine raschere Verdichtung und somit nach einer gewissen Zeit wieder einen großen Festigkeitsgewinn bringt.

Insgesamt ergibt sich nun das folgende Zusammenspiel. Bildet sich zu Beginn des Winters eine dünne Schneedecke,



Anrisskante eines Schneebretts

und bleibt es danach kalt und niederschlagsfrei, setzt durch den großen Temperaturgradienten zwischen Boden und Schneeoberfläche intensive aufbauende Umwandlung ein. Die dabei entstehende schwache Schicht bleibt unter den nachfolgenden Schneefällen in der Regel den ganzen Winter über bestehen; man spricht dann von einem schwachen Fundament der Schneedecke.

Baut sich hingegen anfangs des Winters in kurzer Zeit eine mächtige Schneedecke auf, ist der Temperaturgradient klein und die Überlastung groß, sodass sich ein starkes, stabiles Fundament bilden kann.

Kritisch ist hingegen noch eine andere Situation: wenn sich in klaren und kalten Nächten großkristalliger Oberflächenreif bildet, der bei einem Witterungsumschwung eingeschneit wird. Dabei entsteht eine sehr schwache Zwischenschicht, die für Lawinen eine geeignete Gleitbahn darstellt.

Dem oftmals idyllischen und ruhigen Anblick zum Trotz: Die Schneedecke ist kein gleichförmiges und bewegungslos daliegendes Gebilde. So wie in den einzelnen Schich- ▶



ten ständig metamorphe Prozesse ablaufen, befindet sich die gesamte Decke dauernd in langsamer Bewegung. Längs der Falllinie führt der Schnee eine so genannte Kriechbewegung aus, die vom Boden zur Oberfläche hin zunimmt und einige Millimeter pro Tag erreichen kann. Diesem Kriechen ist bei glattem Untergrund eine Gleitbewegung der ganzen Schicht überlagert, die einige Zentimeter bis sogar einen Meter am Tag betragen kann.

Gefahr durch den Weißen Tod

Die Kräfte, die in der Schneedecke wirken, resultieren in erster Linie aus ihrem Eigengewicht. Hinzu kommen äußere Belastungen durch Skifahrer oder Schneefahrzeuge. Die inneren Kräfte lassen sich am besten an lokalen Veränderungen der Kriech- oder Gleitgeschwindigkeiten erkennen, zum Beispiel an Stellen, an denen sich die Hangneigung ändert. Nimmt diese hangabwärts zu, vergrößern sich die Kriechgeschwindigkeiten, und es entstehen in der Übergangszone Zugkräfte. Nimmt die Hangneigung hingegen ab, entstehen durch Druckkräfte so genannte Druckzonen. Bewegen sich zwei benachbarte Schichten in entgegengesetzter Richtung oder verändern parallele Kriechbewegungen ihre Geschwindigkeiten, so entstehen Scherkräfte. Ihnen gegenüber weist die Schneedecke die geringste Festigkeit auf.

Kommen in einer solchen Situation äußere Belastungen hinzu – wobei wiederum zusätzliche Scherkräfte den größten Einfluss haben –, kann die Schneedecke reißen und talabwärts stürzen. Grundsätzlich können solche Lawinen in zwei Größenklassen unterteilt werden. Relativ kleine Schneemassen mit eher kurzer Sturzbahn und mehrheitlich fließender Bewegungsform werden zumeist von Skifahrern ausgelöst und heißen daher Skifahrerlawinen. Sind große Schneemassen in Bewegung geraten, und ist die Sturzbahn lang, so kann sich eine Katastrophenlawine bilden. Ihr typischer Vertreter ist die Staublawine, die als Schneewolke durch die Luft stiebend mit Geschwindigkeiten von bis zu 300 Kilometern pro Stunde zu Tal rast.

Die von Ski- und Snowboardfahrern verursachten Lawinen gehen zumeist nicht von einem Punkt aus, sondern reißen entlang einer Linie an (Bild Seite 85 oben). Solche Schneebrettlawinen setzen das Vorhandensein von gebundenen Schneeschichten voraus, die Kräfte über weite Strecken übertragen können. Zudem muss die Schneedecke eine Schwachschicht enthalten. Neben der Belastung durch Wintersportler können auch Neuschneefall, ein Temperaturanstieg oder eine aufbauende Umwandlung des Schnees das Reißen auslösen.

Der primäre Riss verläuft entlang einer hangparallelen Gleitfläche und pflanzt sich maximal mit mehreren hundert Metern pro Sekunde fort. An seinen seitlichen Begrenzungsflächen entstehen sekundäre Risse. Dadurch löst sich das Schneebrett vollständig und gleitet zu Tal, wobei es im Mittel Geschwindigkeiten von 80 Kilometern pro Stunde erreicht.

Zur Reduzierung der Lawinengefahr haben sich künstliche Verbauungen und Wiederaufforstungen in den potenziellen Anrissgebieten bewährt. Die Schweiz zum Beispiel unternahm nach dem verheerenden Lawinenwinter 1950/51 enorme Anstrengungen, um den Schutz vor Lawinen zu verbessern. Insbesondere in Bezug auf Katastrophenlawinen wurden große Fortschritte erzielt. Selbst bei den außerordentlichen Schnee- und Lawinenverhältnissen im Winter 1998/99 konnten größere Schäden verhindert werden. Auch die Lawinenwarnung befindet sich heute auf einem sehr hohen Niveau und ist für jedermann über vielfältige Informationskanäle zu erreichen.

Doch trotz aller Anstrengungen sind pro Jahr im Mittel noch immer 22 Todesopfer durch Lawinen im freien Gelände zu beklagen. Dabei verlieren knapp 13 Prozent aller von Lawinen erfassten Personen ihr Leben. Berücksichtigt man ausschließlich ganz verschüttete Opfer, so steigt die Todesrate auf 50 Prozent an. Die Rettungschancen hängen wesentlich davon ab, wie schnell die Verschütteten geborgen werden können. Bereits nach dreißig Minuten kommt für die Hälfte von ihnen jede Hilfe zu spät.

Um Lawinenunglücke gänzlich zu vermeiden, müssen sich die Wintersportler verantwortungsbewusst verhalten und selbst für einen kleinen Ausflug neben die Piste zweckmäßig ausgerüstet sein. Fundiertes Wissen in Schnee- und Lawinenkunde und verlässliche Hintergrundinformationen über die herrschende Lawinensituation bewahren vor verhängnisvollen Schritten und retten so Leben. ■

Anja Schilling *ist Diplom-Geografin und arbeitet am Eidgenössischen Institut für Schnee- und Lawinenforschung in Davos (Schweiz).*

FORSCHUNGSSTANDORT BERLIN-ADLERSHOF

... und der Zukunft zugewandt

In Berlins Südosten wächst Deutschlands größter Technologiepark heran – eine Stadt für Wissenschaft, Wirtschaft und Medien.

Von Peter Strunk

Matthias Scholz baut Laser, spezielle Laser für die hoch sensible Analytik. Weltweit gibt es nur wenige Firmen, die auf diesem Spezialgebiet tätig sind. Scholz war bis 1989 wissenschaftlicher Mitarbeiter an einem Institut der Akademie der Wissenschaften der DDR. Bereits 1990 – noch vor der Wiedervereinigung – gründete der damals 44-jährige Physiker mit drei Kollegen die LTB Lasertechnik Berlin GmbH: „Unser größtes Eigenkapital war das Know-how im wissenschaftlichen Gerätebau.“ Dabei ist es nicht geblieben. Heute arbeiten 25 Menschen bei LTB. Der Umsatz erreichte 2000 über fünf Millionen Mark.

Florian Solzbacher ist 27 Jahre alt. Er gehört mit vier Kollegen zu den Gründern der First Sensor Technology GmbH. Das Unternehmen gibt es seit 1999 – ein Spin-off der Technischen Universität Berlin. Dort hatten die fünf bereits jahrelang silizium-basierte Drucksensoren entwickelt und hergestellt. Auch früher schon lieferten sie Sensoren an medizintechnische Unternehmen sowie an die Luft- und Raumfahrtindustrie. 1999 wagten Solzbacher und seine Kollegen den Sprung in die Selbstständigkeit. Für das Geschäftsjahr 2000 peilte die First Sensor Technology einen Umsatz von 1,5 Millionen Mark an.

Jochen Dittrich lässt modellieren. In seiner Werkstatt entstehen Mock-ups, originalgetreue 1:1-Modelle von Bahnen und Bussen. Dittrich ist Designer. Er entwirft Fahrzeuge – für die Berliner S-Bahn, die Metro in Helsinki und für Busse in Polen. Im Alter von 37 Jahren häng- ▶

AM RANDE

Urfluch und Ekstase im Weltall

Wenn ein Gast erklärt: Ich möchte ein Thema auf die Tapete bringen, das eigentlich gar nicht in meinen Tresor fällt, wäre er auf vielen Partys gleich unten durch. Am Gebrauch des Fremdworts erkennen die Gebildeten, ob einer zu ihnen gehört.

Zu neuen Höhen treibt dieses Gesellschaftsspiel der Prosaist, Dramatiker und Begriffslyriker Botho Strauß in der „Zeit“ vom 20. Dezember. Unter dem Titel „Wollt ihr das totale Engineering?“ tut er kund, dass sein Ekel vor allem Gegenwärtigen, bekannt seit seinem „Spiegel“-Essay „Anschwellender Bocksgesang“, nun auch Technik und Naturwissenschaft erfasst hat. Auszug: „Der Wissenswille hebt sich mit Urfluchdrall über den Menschen hinweg und wird als reine noetische Ekstase ohne ihn durchs Weltall irren.“

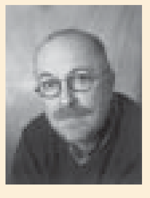
Für seinen Rundumschlag bedient sich Strauß erlesener Bildungsbrocken. Offensichtlich sollen sie den Abstand zu den Zeitgenossen noch weiter vergrößern. Unter den Fremdwörtern, die er aufführt, sind einige so rar, dass die „Zeit“-Redakteure dem Essay eigens ein Glossar beifügen mussten. Dort erfährt man etwa, dass „Fulgurist“ etwas mit Blitzen zu tun hat, „Kenosis“ Entleerung bedeutet und sich hinter „Empuse“ eine weibliche Schreckensgestalt verbirgt. Das ist sicher ein Gewinn: Entdeckt beispielsweise einer im Theater aus der Loge unten im Parkett seine Schwiegermutter, kann er ungestraft von der Empore mit Emphase „Empuse“ rufen, denn welche Schwiegermutter liest schon Botho Strauß.

Um zu beweisen, dass er sich auch in den Naturwissenschaften auskennt, belehrt uns der Schöngeist, was ein „Pictonewton“ ist, nämlich der „Hauch einer Kraftveränderung“ oder – ganz populärwissenschaftlich – die „Kraft, die der gebündelte Lichtkegel einer Taschenlampe auf eine angestrahlte Fläche ausübt“.

Damit bringt er leider etwas auf die Tapete, was offensichtlich nicht in seinen Tresor fällt. Denn zwar gibt es Pikonewton, das heißt billionstel Newton, aber Pictonewton gibt es nicht. Piktogramme hingegen weisen allerorten auf Nützliches hin, etwa auf das stille Örtchen für die Kenosis. Botho Strauß hält das Piktogramm offenbar für den winzigen Bruchteil eines Gramms und adelt es nach dem aus der Werbung für Circus und Cigarette bekannten Vorbild durch ein „c“.

„So werden die Maße der Technik immer feiner und die des Geistes immer gröber“, folgert Strauß. Wie wahr. Er sollte als Erfinder der neuen Maßeinheit „1 Pictobotho“ in die Geisteswissenschaft eingehen.

Michael Springer



Der Autor ist promovierter Physiker und ständiger Mitarbeiter bei Spektrum der Wissenschaft.

ten er und neun Kollegen ihren Job bei einem bedeutenden Schienenfahrzeughersteller an den Nagel und hoben die IFS-Designatelier GmbH aus der Taufe. Was die zehn zuvor für ein großes Unternehmen machten, erledigen sie nun auf eigene Rechnung und sind damit „mehr als zufrieden“. Das Atelier erreichte 2000, im dritten abgeschlossenen Geschäftsjahr, einen Umsatz von 1,2 Millionen Mark und zählt Firmen wie Bombardier, Adtranz oder Neoplan Polska zu seinen Kunden.

Scholz, Solzbacher und Dittrich sind drei typische Unternehmer aus Berlin-Adlershof. Dort, an Berlins südöstlichem Stadtrand entsteht die „Stadt für Wissenschaft, Wirtschaft und Medien“. Herzstück ist ein 78 Hektar großer Wissenschafts- und Technologiepark. 365 Firmen mit rund 3800 Beschäftigten haben sich dort bereits angesiedelt. Von den reinen Dienstleistern abgesehen, konzentrieren sich die Unternehmen auf vier Technologiefelder:

- Informations- und Medientechnologie,
- Photonik und optische Technologien,
- Material- und Mikrosystemtechnologie,
- Umwelt-, Bio- und Energietechnologie.

Hinzu kommen zwölf außeruniversitäre Forschungsinstitute mit rund 1300 Beschäftigten, darunter 800 Wissenschaftlern. Unter den Forschungsinstituten befinden sich so renommierte Einrichtungen wie die Elektronenspeicherring-Anlage BESSY II, eine Hochbrillanzstrahlungsquelle der dritten Generation. Sie ging 1998 in Betrieb und zählt zu den weltweit bedeutendsten ihrer Art. Internationales Renommee besitzt auch das Institut für Weltraumsensorik und Planetenerkundung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, wo man sich mit Erdbeobachtung und Planetenerkundung beschäftigt und zu diesem Zweck 3-D-Kameras und Satelliten baut.

Außeruniversitäre Institute und innovative Firmen sind zwei Fundamente, auf denen das Projekt Adlershof verwirklicht wird. Das dritte sind die naturwissenschaftlichen Institute der Humboldt-Universität zu Berlin. Sie ziehen derzeit aus der Mitte Berlins nach Adlershof um. Die Mathematiker und Informatiker sind schon da. Im September 2001 werden die Chemiker folgen, 2002 die Physiker. Danach kommen die Geografen, die Psychologen und zuletzt die Biologen.

Netzwerk Adlershof

Die Nähe von außeruniversitärer Wissenschaft, von universitärer Forschung und Lehre ist gewollt. In Adlershof sollen Synergien entstehen, Netzwerke aufgebaut und Innovationszyklen verkürzt werden. Schon heute geben rund siebzig Prozent der Unternehmen an, mit mehr als drei Partnern am Standort in der Forschung, der Entwicklung und bei der Fertigung zu kooperieren.

In Adlershof soll nicht nur ein Forschungs- und Technologiepark entstehen. Das Land Berlin möchte auch das umliegende Gelände städtebaulich entwickeln lassen. 1994 wurde daher Berlin-Adlershof als Entwicklungsgebiet mit einer Gesamtfläche von 4,2 Quadratkilometern ausgewiesen. Im unmittelbaren Umfeld des Technologieparks entsteht dort ein Ensemble aus Wohnquartieren, Läden, Hotels, Restaurants, Kinos, Schulen und einem siebzig Hektar großen Landschaftspark. Im Jahr 2010 soll alles fertig sein. Dann, so die Erwartung, werden in Adlershof bis zu 17 000 hoch qualifizierte Fachkräfte arbeiten, 3000 Wissenschaftler lehren und forschen, 5000 Studenten lernen sowie rund 5000 Menschen wohnen.

Ein Projekt mit beachtlichen Ausmaßen und ehrgeizigen Zielen. Doch in Berlin sind sich Politik, Wissenschaft und Wirtschaft einig, dass etwas geschehen muss. Die Stadt hat sich das Ziel gesetzt, wieder ein führendes Wirtschafts- und Wissenschaftszentrum zu werden, so wie es einst vor der Zeit des Nationalsozialismus war. Adlershof spielt dabei eine herausragende Rolle. Dies dokumentiert schon allein die Summe, die investiert wurde: 1,6 Milliarden Mark waren es seit ▶

1991. Insgesamt werden bis 2010 fünf bis sechs Milliarden Mark, davon ein beträchtlicher Teil privates Kapital, in das Projekt fließen.

„Adlershof ist im Jahr 2000 aus einer von der Politik initiierten Aufbauphase in eine von Wirtschaft und Wissenschaft angetriebene Lebensphase getreten", so Professor Rolf Scharwächter, der Generalbevollmächtigte für den Standort Berlin-Adlershof. Aber noch gibt es dort Unzulänglichkeiten und viele Baustellen, noch fehlt das kreative Flair. „Insofern sind wir noch Pioniere", fügt Scharwächter hinzu.

Adlershof hat Tradition, auch wenn diese scharfe Zäsuren erlebte. Auf dem Gelände des heutigen Entwicklungsgebietes befand sich früher der Flughafen Berlin-Johannisthal, wo 1909 Deutschlands erste Motorflugzeuge starteten. Während des Ersten Weltkrieges wurde dort die Deutsche Versuchsanstalt für Luftfahrt (DVL) angesiedelt. Noch heute sind auf dem Gelände Relikte jener Zeit, wie Flugzeughangars, aber auch so bemerkenswerte Bauten wie Windkanal

GASTKOMMENTAR

Therapeutisches Klonen – Für und Wider

In Europa ist Großbritannien erneut Vorreiter bei der biotechnologischen Forschung am Menschen: Das britische Unterhaus stimmte Mitte Dezember mit großer Mehrheit dafür, das Klonen von Embryonen für therapeutische Zwecke zu erlauben. Wegen der weitreichenden gesellschaftlichen Bedeutung des Gesetzes war zuvor der Fraktionszwang aufgehoben worden. Zwar ist noch die Zustimmung des Oberhauses erforderlich, aber selbst wenn diese verweigert werden sollte, kann sich das Unterhaus mit einer erneuten Abstimmung darüber hinwegsetzen. Der Abstimmung vorausgegangen war eine leidenschaftlich geführte Debatte, zum Teil auf hohem Niveau. Befürworter und Gegner des Klonens machten die ethische Verantwortung geltend, die gegenüber dem ungeborenen Leben besteht, aber auch gegenüber dem jetzt noch unheilbaren Kranken, dem vielleicht mit dieser neuen Technologie geholfen werden kann.

Nach dem neuen britischen Gesetz dürfen bis zu 14 Tage alte Embryonen geklont werden. Aus den daraus gewonnenen Stammzellen, die sich im Prinzip in viele der mehr als 200 unterschiedlichen Zelltypen des menschlichen Körpers weiterentwickeln können, soll gesundes Gewebe zur Heilung schwer kranker Patienten hergestellt und dann in deren Körper eingepflanzt werden. Dem Klonen für Forschung und Therapie ist damit das Tor geöffnet; Klonen für die Fortpflanzung, also zur Erzeugung ganzer Menschen, bleibt dagegen weiterhin verboten.

Forschung zwischen rechtlichen und ethischen Grenzen

Wie sieht aber nun in Deutschland die Rechtslage aus? Das hiesige Embryonenschutzgesetz verbietet das Klonen von Embryonen zu therapeutischen Zwecken und die Isolierung von embryonalen Stammzellen. Wäre es aber zulässig, Zellen aus abgegangenen Föten zu isolieren, aus anderen Ländern einzuführen oder sich als deutscher Wissenschaftler an diesbezüglichen Forschungen im Ausland zu beteiligen?

Letzteres ist am einfachsten zu beurteilen, denn das Embryonenschutzgesetz gilt nur für Arbeiten im Inland. Die Isolierung so genannter primordialer Keimzellen aus abgegangenen Föten wird weder von diesem noch von anderen Gesetzen geregelt. Die Richtlinien der Bundesärztekammer erwähnen aber, dass fetale Zellen und fetales Gewebe aus Schwangerschaftsabbrüchen in zunehmendem Maße für experimentelle und klinische Forschungsvorhaben genutzt werden. In Übereinstimmung mit einer Stellungnahme der Deutschen Forschungsgemeinschaft ist deshalb davon auszugehen, dass diese Methode nicht gegen geltendes Recht verstößt. Ob damit ein gesteigertes Interesse an Abtreibungen entstehen könnte, muss für die rein rechtliche Beurteilung außer Betracht bleiben.

Hinsichtlich des Imports humaner Zellen aus dem Ausland gilt, dass die Einfuhr von Embryonen, nicht aber die von pluripotenten embryonalen Stammzellen verboten ist. Wenn die Zellen aus Ländern importiert werden, in denen die Entnahme aus menschlichen Embryonen erlaubt ist, kann der deutsche Wissenschaftler aber belangt werden, falls er zu dieser Entnahme angestiftet hat. Bei schon kultivierten Zelllinien lässt sich ein Vorwurf der Anstiftung seitens des Forschers durch Laboraufzeichnungen widerlegen, aus denen hervorgeht, dass die Zellen nicht wegen der Anfrage aus Deutschland entnommen wurden. In bestimmten rechtlichen Grenzen ist also die Forschung an embryonalen Stammzellen in Deutschland und von deutschen Wissenschaftlern im Ausland erlaubt.

Eine andere Frage ist, ob in Deutschland tatsächlich an Embryonen zu therapeutischen Zwecken geforscht werden sollte. Die rechtlichen Grenzen könnten durch ein künftiges Fortpflanzungsmedizingesetz, dessen Eckpunkte inzwischen vorliegen, enger oder weiter gezogen werden. Wissenschaftliche und ethische Argumente werden gegen das therapeutische Klonen mit embryonalen Stammzellen ins Feld geführt, die stichhaltig zu sein scheinen: Als Alternative rückt die Entnahme so genannter adulter Stammzellen ins Blickfeld. Damit ist gemeint, dass spezialisiertere Stammzellen aus dem Körper Erwachsener zur Therapie ihrer eigenen Krankheiten verwendet werden können. Diese Technik soll einfacher und vielversprechender sein. Zumindest ist nicht erwiesen, dass therapeutisches Klonen mit embryonalen Stammzellen der einzig mögliche Weg ist, auf dem die Wissenschaft zur Heilung oder Linderung schwerer Krankheiten voranschreiten kann. Hinzu kommt die ethische Problematik, Embryonen für wissenschaftliche und therapeutische Zwecke herzustellen und zu nutzen. Diese Problematik ist bisher nicht hinreichend in allen Facetten diskutiert worden. Deshalb sollten wir vor einer schnellen Regulierung durch eine neues Fortpflanzungsmedizingesetz die ethische und politische Debatte in Deutschland und auf europäischer Ebene intensiv fortsetzen, um nicht zu früh die Tür zuzuschlagen, zumal auch Frankreich mit einem neuen Gesetz die Forschung an Embryonen genehmigen will.

Dr. Jürgen Simon

Der Autor ist Professor für Wirtschafts- und Umweltrecht an der Universität Lüneburg und leitet das dortige Forschungszentrum „Biotechnologie und Recht".

und Trudelturm zu finden. Während des Zweiten Weltkrieges dominierte die deutsche Luftwaffe das Gelände. 1945 folgte die sowjetische Siegermacht. Die technischen Einrichtungen wurden – soweit sie nicht zerstört waren – demontiert und der Flugplatz stillgelegt.

Zu DDR-Zeiten bekam der Name des Standortes Adlershof einen anderen Klang. Der Deutsche Fernsehfunk bzw. das Fernsehen der DDR nahm dort seinen Sitz. Auch die DDR-Staatssicherheit bemächtigte sich eines Teil dieses Terrains und stationierte dort ihr „Wachregiment Feliks Dzerschinski“. Zusätzlich kam die Akademie der Wissenschaften der DDR mit ihren naturwissenschaftlichen Instituten nach Adlershof. Der Standort kann eine ganze Reihe bedeutender Forschungsergebnisse vorweisen. So sind dort die Gleitsichtbrille und der Fiberglasstab für Stabhochspringer erfunden worden. Ein bedeutender Pharmahersteller aus dem Westteil Berlins produzierte Antibabypillen auf der Grundlage von Patenten, die teils aus der Akademie der Wissenschaften kamen – für die chronisch devisenschwache DDR eine willkommene Einnahmequelle.

Im Jahr 1989 arbeiteten allein in den naturwissenschaftlichen Instituten der Akademie der Wissenschaften über 5000 Menschen, beim Fernsehen waren es über 2000. Beide Institutionen sollten die Wiedervereinigung Deutschlands nicht lange überleben. Sie passten nicht in die föderale Forschungs- und Medienlandschaft der Bundesrepublik.

Ziel: Innovationszentrum und Wachstumsmotor

Als Ende 1991 die Akademie der Wissenschaften der DDR ihre Tätigkeit einstellte, hatte der Berliner Senat längst beschlossen, Adlershof zu einem Wissenschafts- und Wirtschaftsstandort auszubauen. Es folgte die Zeit der Evaluierungen durch den Wissenschaftsrat und durch die Technologiekommission des Landes Berlin. Der Personalbestand der einstigen Akademie der Wissenschaften wurde auf 1500 Mitarbeiter reduziert – ein harter Schnitt. Es gelang jedoch, zahlreiche technologieorientierte Firmen aus den Instituten auszugründen, von denen sich viele am Standort inzwischen erfolgreich etabliert haben.

Zudem war es möglich, eine Reihe namhafter Forschungseinrichtungen in die bundesdeutsche Forschungslandschaft zu überführen, allen voran das Institut für Kosmosforschung. Es gehört heute zum Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), dem Rechtsnachfolger der DVL. Beispiele dafür sind aber auch das Hahn-Meitner-Institut, das die Grundlagen der Photovoltaik erforscht, und das Max-Born-Institut für Nichtlineare Optik und Kurzzeitspektroskopie. Dessen Forschungsschwerpunkt liegt in der Erzeugung und Nutzung von ultrakurzen und/oder ultraintensiven Laserpulsen.

Anfang der neunziger Jahre setzte in Adlershof eine rege Sanierungs- und Bautätigkeit ein. Es wurden 33 Kilometer Straßen angelegt und zahlreiche Gebäude bei laufendem Betrieb saniert. Rund 200 Gebäude waren in ihrer Bausubstanz so beschädigt, dass sie abgerissen werden mussten. Zur Ansiedlung von Unternehmen wurden moderne Zentren errichtet, teils sanierte Altbauten, teils Neubauten mit spektakulärer und preisgekrönter Architektur.


FRIEDRICH BUSAM/ARCHITEKTURPHOTO

Die Humboldt-Universität zu Berlin hat in Adlershof einen modernen Campus errichtet.

Der Ausbau von Adlershof ist langfristig angelegt. Knapp die Hälfte des Vorhabens ist bisher realisiert worden. Standen in den vergangenen Jahren die Fertigstellung der Zentren und die Sanierung der Infrastruktur im Vordergrund, liegen die Prioritäten nunmehr in einem offensiven Marketing und in einer systematischen Akquisition.

Innovationen entstehen zunehmend in den Schnittmengen von Forschungs-, Entwicklungs- und Produktionsprozessen sowie verschiedener Grundlagen- und Anwendungsfelder. Darum verfolgen die Konzepte vieler Technologieparks das Ziel, die Wissenschaft auf bestimmte Technologiefelder zu konzentrieren – und zwar mit konkretem Nutzen für Wissenschaft und Gesellschaft. Dafür bedarf es eines neuen Denkens: Sachverhalte müssen ganzheitlich und vernetzt betrachtet werden. Wettbewerber sind nicht nur Konkurrenten, sondern auch Partner.

Nicht anders verhält es sich in Berlin-Adlershof. Die neue Stadt für Wissenschaft, Wirtschaft und Medien bietet schon jetzt eine hohe Konzentration und Qualität wissenschaftlicher Einrichtungen, ein aufnahmebereites Umfeld für Gründungen sowie außerdem ein vielfältiges Instrumentarium zur geschäftlichen, finanziellen sowie personellen Vernetzung.

Jetzt geht es also darum, Adlershof regional zu integrieren und gleichzeitig seine Technologiefelder zu erweitern. Im nächsten Schritt soll der Technologiepark zu einem „Center of Excellence“ ausgebaut werden, einem internationalen Innovationszentrum und wirtschaftlichen Wachstumsmotor für die Region. Der Weg dorthin ist noch weit, jedoch immerhin zählt Adlershof schon heute zu den 15 größten und modernsten Technologieparks der Welt. ■

Dr. Peter Strunk *ist Leiter der Kommunikation der WISTA-Management GmbH. Diese ist für die Entwicklung, Führung und Verwaltung des Technologieparks Berlin-Adlershof zuständig.*

Seiten 92 bis 94: Anzeige und Beihefter



Farbig erscheinende photographische Aufnahmen

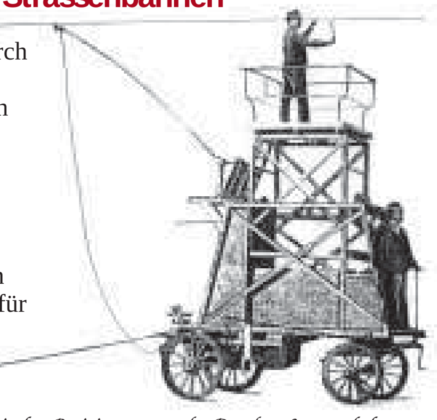
Nach dem neuen Verfahren nach U. Trillat in Paris wird der an Films oder photographischen Platten das entwikkelte Bild darstellende amorphe Silberniederschlag in einen Niederschlag umgewandelt, der nicht mehr pulverförmig oder umzusammenhängend ist, sondern aus ununterbrochenen Lamellen oder Plättchen von metallischem Aussehen besteht. Diese sind nach ihrer Dicke, ihrer Zahl und ihrer Beschaffenheit im Stande, lebhafte Farbentöne zu liefern, die im reflectirten Lichte sichtbar und bei der Projection durch Reflexwirkung verwendbar sind. ... Die erhaltenen Farbentöne sind auch unter einem sehr großen Winkel sichtbar; sie geben keinen vielfarbigen Wiederschein an ein und demselben Punkte. (*Der Stein der Weisen, 26. Bd., 1901, S. 94*)

Eine Methode zum sicheren Nachweis von Menschenblut

Will man also untersuchen; ob Blutflecken, z.B. auf einem Gewebe, von Menschenblut oder Tieren herrühren, so wäscht man die Flecken mit einer 1,6% Kochsalzlösung aus und versetzt sie mit dem Serum eines Kaninchens, dem Menschenblut eingespritzt war. Tritt eine Trübung der Lösung ein, so rühren die Flecken zweifellos von Menschenblut her, bleibt die Lösung klar, so hat man es mit Tierblut zu thun. Falls es von Wert ist, nachzuweisen was für Tierblut die Flecken verursacht hat, so muss man eine ganze Reihe von Kaninchen zur Verfügung haben, denen die verschiedensten Blutarten eingespritzt sind, dem einen Rinder-, dem anderen Hammel-, dem dritten Hundeblut u.s.f. Das Serum, welches die Trübung veranlasst, lässt dann erkennen, von welchem Tier der Blutflecken stammte. (*Die Umschau, Nr. 9, V. Jg., 23. Februar 1901, S. 176*)

Revisionswagen für Oberleitung elektrischer Strassenbahnen

Zu der Konstruktion des Wagens ... ist zu erwähnen, dass durch geeignete Einrichtungen es ermöglicht werden soll, 4 Räder anzutreiben und beide Achsen zu lenken, dass es ferner durch die geeigneten Wagenkontakte möglich ist, an jeder Stelle Strom für die Motoren zu entnehmen, und dass selbst da, wo durch Zufälligkeiten die Abweichungen vom Fahrdraht und Geleis das vorgeschriebene Maass überschritten haben, es durch geeignete Hilfskontakte sicher gestellt ist, Strom zu entnehmen. Dieser letzterwähnte Fall kommt besonders dann vor, wenn mitten auf der Strecke umgedreht werden soll, wofür sich die Mitführung besonderer Schienenkabel und einer Stange mit Oberleitungsklemme erforderlich macht. (*Elektrotechnischer Anzeiger, Nr. 13, 18. Jg., 14. Februar 1901, S. 411*)


Elektrischer Revisionswagen der Dresdner Strassenbahn

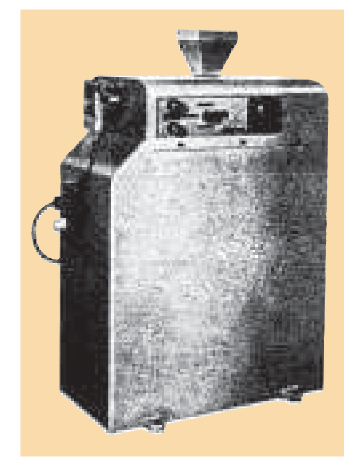


Komet Encke wieder aufgefunden

Auf der Mt. Wilson-Sternwarte in den USA wurde mit dem 60"-Spiegel der bekannte Enckesche Komet als winziges Objekt 20. Größe wieder aufgefunden. Er wird sein Perihel (Sonnennähe) im März 1951 durchlaufen. Dieser Periheldurchgang ist dann der 51. seit der Erstentdeckung des Kometen durch Méchain im Jahre 1786. Dieses ist die 43. Wiederentdeckung des Kometen, der in mehr als 150 Jahren fast bei jeder Wiederkehr in Sonnennähe beobachtet wurde. Das ist ein wirklich einzigartiger Rekord. (*Kosmos, Heft 2, 47. Jg., Februar 1951, S. 95*)

Neutronenzähler für strahlengefährdete Betriebe

Ingenieure der General Elektric Co. konstruierten ein Instrument zum Nachweis von Neutronen, die von radioaktivem Material ausgesandt werden. Dieser „Neutronenzähler“ dient zum Schutze des Personals von Atomenergie-Forschungslaboratorien und von Kliniken, die mit neutronenausstrahlenden Präparaten arbeiten. Das Zählrohr hat einen Durchmesser von etwa drei Zentimeter und ist vierzig Zentimeter lang. Im Innern ist es mit Bor ausgekleidet, das die Fähigkeit besitzt, langsame Neutronen einzufangen. Sobald ein Neutron auf ein Boratom trifft, sendet dieses zwei Partikel in entgegengesetzter Richtung aus. Diese rufen bei Zusammenstößen mit Atomen des Edelgases Argon, mit dem das Rohr gefüllt ist, einen elektrischen Stromstoß hervor. Die Zahl der Stromstöße entspricht unmittelbar der Zahl der Neutronen. (*Orion, 6. Jg., Nr. 4, 2. Februarheft 1951, S. 148*)



Kleine Schneckenpresse zum Spritzen von Kunststoffen

Eine Längsbohrung in der Schnecke gestattet beliebige Kühlung. Der Stahlzylinder ist gehärtet und geschliffen, wodurch die Reibung auf ein Minimum beschränkt und die Leistung gesteigert wird. Die Einfüllzone ist gekühlt. Zylinder und Spritzkopf sind mit drei voneinander unabhängig regelbaren elektrischen Heizungen versehen, so daß einwandfrei abgestufte Temperaturführung möglich ist. (*Kunststoffe, 41. Jg., Heft 2, Februar 1951, S. 64*)

Schneckenpresse für Kunststoffe

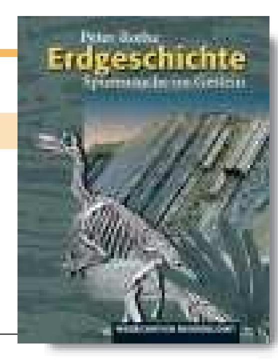
GEOLOGIE

Peter Rothe

Erdgeschichte

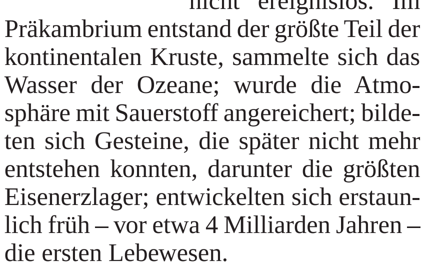
Spurensuche im Gestein

Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt 2000.
240 Seiten, DM 79,–



Kambrium, Ordovizium, Silur – haben auch Sie die „Systeme“ der Erdgeschichte auswendig lernen und aufsagen müssen, ohne viel damit zu verbinden? Der Mannheimer Geologieprofessor Peter Rothe erfüllt diese Begriffe buchstäblich mit Leben – und nicht nur mit Leben. Meere drangen immer wieder auf das Festland vor und zogen sich wieder zurück, mal sprühte die Erde Feuer in einem Ausmaß, das uns heute unvorstellbar erscheint, mal überzog sie sich in weiten Gebieten mit kilometerdickem Eis. Gebirge wurden aufgeschoben und wieder abgetragen. Und unentwegt wurden Kontinentalblöcke um die Erde verfrachtet und zu immer anderen Konstellationen zusammengepuzzelt.

Rothes Erdgeschichte beginnt denn auch nicht erst mit dem Kambrium, mit dem Zeitabschnitt, in dem erstmals und auch ziemlich unvermittelt eine Vielfalt komplexer Lebewesen auftaucht. Da waren von den 4,6 Milliarden Jahren der gesamten Erdgeschichte bereits sieben Achtel vergangen. Diese lange Zeit war durchaus nicht ereignislos. Im Präkambrium entstand der größte Teil der kontinentalen Kruste, sammelte sich das Wasser der Ozeane; wurde die Atmosphäre mit Sauerstoff angereichert; bildeten sich Gesteine, die später nicht mehr entstehen konnten, darunter die größten Eisenerzlager; entwickelten sich erstaunlich früh – vor etwa 4 Milliarden Jahren – die ersten Lebewesen.



Kreide-Leitfossil: Ammonit

Nachdem Rothe Vorlesungen über Erdgeschichte vor allem für Nebenfach-Studierende gehalten hat, zielt er mit diesem Buch auf einen breiteren Leserkreis. Folgerichtig stellt er dem Hauptteil ein paar Kapitel „Grundlagen“ voran, beginnend mit dem „Lagerungsgesetz“ und dem „Aktualitätsprinzip“. Beide erscheinen uns heute trivial: dass Gesteine in der Reihenfolge, in der sie übereinander liegen, abgelagert wurden und dass sich geologisches Geschehen in der Vergangenheit kontinuierlich, ohne wundersame Kräfte und Sprünge vollzogen hat, so wie wir es in der Gegenwart beobachten können.

Rothe stellt die wichtigsten Gruppen von Fossilien vor, erklärt eingehend, wie das Alter von Gesteinen bestimmt werden kann, und erläutert unter dem Begriff der Fazies, wie die Merkmale unterschiedlicher Gesteine die Bedingungen widerspiegeln, unter denen sie jeweils abgelagert worden sind.

Ein schönes Beispiel: „Wenn man die Knochen toter Kamele in feinkörnigem Sandstein findet, dessen Schichtung so aussieht wie die heutiger Dünen, und wenn die Sandkörner zudem noch rötlich gefärbt sind, dann hat man schon eine ganze Reihe von Kriterien, aus denen sich die Bildungsbedingungen dieses Gesteins rekonstruieren lassen … Sanddünen werden vor allem da entstehen, wo nur geringe Vegetation den äolischen Sandtransport behindert … Die rote Farbe der Sandkörner ist auf dünne Hämatithäutchen zurückzuführen, die die Quarzkörner umschließen, und Hämatit (Fe_2O_3) bildet sich unter den Bedingungen der Erdoberfläche nur in warmem Klima … “

Dann geht es Kapitel für Kapitel, vom Präkambrium bis zum Quartär, durch die Erdgeschichte. Natürlich ist es unmöglich, auf jeweils 6 bis 18 Seiten zu berichten, was sich im Laufe von vielleicht 50 Millionen Jahren rund um die Erde getan hat. Rothe arbeitet die charakteristischen Züge der Zeitabschnitte gut heraus. Bei den angeführten Beispielen konzentriert er sich weitgehend auf Mittel- und Westeuropa. Dennoch dürfte in der vom Autor angestrebten Informationsdichte manches das Interesse fachferner Leser überfordern. Das ist nicht so tragisch: Man blättert ein wenig weiter und gewinnt wieder Grund.



Gebänderte Kieseleisenerze lassen Rückschlüsse auf die Zeit ihrer Entstehung zu: Die roten Eisenoxidschichten können sich nur in zumindest sauerstoffarmer Atmosphäre abgelagert haben, und die großen Mengen Kieselsäure legen einen präkambrischen Soda-Ozean nahe, der sich erst allmählich zum Kochsalz-Ozean entwickelte.

Hilfreich ist dabei der strenge Aufbau der Kapitel. Die Zeitabschnitte sind jeweils gegliedert in „Begriff und Abgrenzung“, „Flora und Fauna“, „Fazies“, „Stratigraphie“ und „Zusammenfassung“, mitunter ergänzt durch spezielle Betrachtungen, etwa über „Die Variskische Gebirgsbildung“, „Die Besonderheiten der Kreide-Tertiär-Grenze“ oder „Die Entstehung der quartären Eiszeiten“. Im Anhang folgen für Leute, die es ganz genau wissen wollen, ausführliche stratigraphische Tabellen zu den einzelnen Systemen, ein umfangreiches Literaturverzeichnis und ein Register.



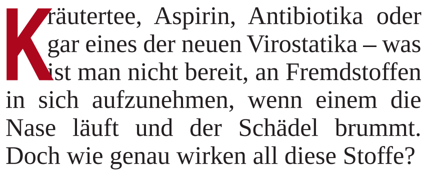
Cephalopode aus der Kreide

Die schön gezeichneten Fossilientafeln sind einem über siebzig Jahre alten Lehrbuch entnommen – eine gute Idee. Die den einzelnen Zeitabschnitten jeweils vorangestellten Kärtchen über die Verteilung der Festländer – eigentlich auch eine gute Idee – geben zwar den Wissensstand von 1981 wieder, stimmen jedoch, wie Rothe einräumt, „nur in Grundzügen mit neueren Daten überein“. Wenn der Autor darauf verweist, dass die neueren Daten im Internet abrufbar seien, aber nicht einmal Adressen nennt, hat er offensichtlich den erhofften breiteren Leserkreis aus dem Auge verloren. Der Zugang zu den mit sichtlich viel Mühe ausgearbeiteten stratigraphischen Tabellen wird unnötig erschwert, indem die Erklärungen der zahlreichen Zeichen 190 Seiten weiter vorn im Vorwort versteckt sind. Dabei wäre direkt bei den Tabellen genügend Platz gewesen.

Trotz dieser Kritikpunkte lautet das Fazit: empfehlenswert.

Erwin Lausch

Der Rezensent ist promovierter Biologe und Wissenschaftsjournalist mit Schwerpunkt Geologie in Ahrensburg.





MEDIZIN

Susan Aldridge

Zaubermoleküle

Wie Medikamente, Heilkräuter, Drogen und Alltagsdrogen wirken

Aus dem Englischen von Dietmar Zimmer.
Birkhäuser, Basel 2000. 298 Seiten, DM 49,80

Kräutertee, Aspirin, Antibiotika oder gar eines der neuen Virostatika – was ist man nicht bereit, an Fremdstoffen in sich aufzunehmen, wenn einem die Nase läuft und der Schädel brummt. Doch wie genau wirken all diese Stoffe?

Die britische Fachjournalistin Susan Aldridge führt den Leser sorgfältig durch die Welt der kleinen Moleküle mit den „zauberhaften" Wirkungen. Und sie verspricht nicht zuviel im Untertitel. Sinnvoll gegliedert beschäftigt sich ihr Buch mit dem breiten Spektrum der Medikamente und widmet den häufigsten Erkrankungen, wie Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Krebs und Infektionen, jeweils ein eigenes Kapitel. Psychopharmaka, Alltagsdrogen wie Kaffee, Alkohol und Nikotin sowie illegale Drogen finden ebenfalls angemessenen Raum.

Aspirin (Acetylsalicylsäure) kennt heutzutage jedes Kind. Doch die bitter schmeckende Salicylsäure ist keine Entdeckung der Neuzeit. Schon in den Tagen des griechischen Arztes Hippokrates wurde sie als Heilmittel gegen Schmerzen und Fieber eingesetzt. Um die bittere Pille etwas zu versüßen, versah Felix Hofmann die Säure 1899 mit einer zusätzlichen Acetylgruppe und erfand damit eins der erfolgreichsten Medikamente aller Zeiten.

Doch nicht für jedes Medikament gelingt die Markteinführung. Und bis das Produkt seinen Weg vom Labor zum Patienten findet, vergehen im Schnitt zwölf Jahre. Die „Zaubermoleküle" bieten einen detaillierten Überblick über die langwierige und kostspielige Entwicklung eines neuen Wirkstoffes vom Reagenzglas über die Phasen der klinischen Prüfung bis in die Apotheke.

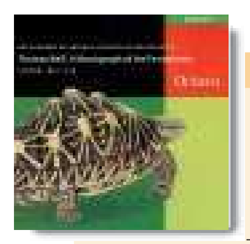
Zu manchen Wirkstoffen kamen die Wissenschaftler allerdings wie die Jungfrau zum Kind. So wurde das erste Antidepressivum, Iproniazid, 1952 als Mittel gegen Tuberkulose eingesetzt. Doch bald fiel den Ärzten auf, dass ihre Patienten ausgesprochen fröhlich und heiter darauf reagierten. Ab 1957 wurden 400 000 Patienten gegen ihre Depressionen mit dieser Substanz behandelt, bevor sie wegen schwerer Nebenwirkungen zurückgezogen wurde. Und hätte Alexander Fleming 1928 seine Bakterienkulturen sorgfältiger gegen das Eindringen eines Schimmelpilzes geschützt, hätte er nicht das erste Breitbandantibiotikum entdeckt. Penicillin rettete bereits im Zweiten Weltkrieg unzähligen Menschen das Leben, stand für die Zivilbevölkerung allerdings erst ab 1946 zur Verfügung.

Doch nicht nur Medikamente greifen in den biochemischen Zustand unseres Körpers ein. Auch Kaffee, Alkohol und Nikotin haben tief greifende Auswirkungen auf unser inneres Gleichgewicht. Was passiert in unserem Körper nach der morgendlichen Tasse Kaffee? Und worin besteht das Suchtpotenzial von Alkohol, Heroin oder Ecstasy? Zu der heutigen Partydroge weiß Aldridge eine kuriose Geschichte beizutragen: Zwischen den fünfziger und siebziger Jahren wurde das Amphetaminderivat in der Ehetherapie eingesetzt, um Barrieren zwischen den Partnern abzubauen und Zuneigung füreinander zu wecken. Ob dieses Ziel erreicht wurde, verrät das Buch nicht.

Als leichte Lektüre vor dem Schlafengehen ist dieses Buch sicherlich nicht geeignet, denn es vermittelt geballtes Wissen, das ohne Vorkenntnisse schlecht zu verdauen ist. „Der HIV-Virus" ist dem Korrektor durchgerutscht, und an die moderne Schreibweise „Estrogen" muss man sich gewöhnen. Doch wer durchhält, wird mit einer Fülle von Fachwissen belohnt – und ein paar hübschen Überraschungen und Anekdoten obendrein.

Dagmar Knopf

Die Rezensentin ist promovierte Biologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Düsseldorf.



ZOOLOGIE

Thomas Bell

A Monograph of the Testudinata

CD-Rom nach dem Original von 1832–1836.
Octavo (www.octavo.com), Oakland (Kalifornien) 2000. $ 35,–

Nur selten hat man das Vergnügen, ein kostbares altes Buch in die Hand zu nehmen. Der Octavo-Verlag verhilft aber zu einem fast authentischen Ersatz. Dank digitaler Datenbanken können Sie in jahrhundertealten Werken „blättern".

Jetzt erschien auf CD die Schildkrötenmonografie des englischen Naturforschers Thomas Bell, entstanden in den dreißiger Jahren des 19. Jahrhunderts. Sämtliche Texte und Abbildungen des Bandes, der bis heute als einer der umfassendsten über diese Reptilien gilt, haben die Herausgeber Doppelseite für Doppelseite eingespeichert. Dazu liefern sie ausführliche Informationen über Werk und Autor.

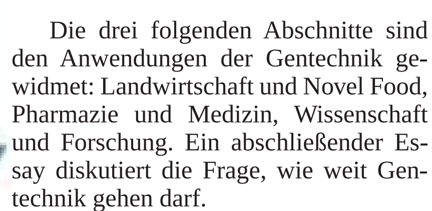
In der gleichen Reihe sind bis jetzt fast dreißig CDs erschienen, darunter auch Klassiker wie Dürers „Underweysung der Messung", „De revolutionibus orbium coelestium" von Nikolaus Kopernikus und das Anatomiebuch „De humani corporis fabrica" des Andreas Vesalius von 1543.

Die Anweisungen zum Gebrauch der CD sind gut verständlich aufgebaut. Auch wer mit dem elektronischen Medium noch nicht viel Erfahrung hat, versteht schnell, wie er gewünschte Seiten finden, Bildausschnitte in praktisch beliebiger Vergrößerung heranholen, nach Stichworten im Text suchen oder sich Passagen und einzelne Abbildungen ausdrucken lassen kann. Experten dürften rasch auf die gewünschte Fachinformation treffen.

Wer nichts Bestimmtes sucht, kann sich vor- und rückwärts durch den Band blättern – die Doppelseiten scheinen aufgeschlagen vor dem Betrachter zu liegen – oder sich einzelne Kapitel anschauen und die Abbildungen bewundern, die weitgehend von Edward Lear stammen, einem der besten naturkundlichen Lithographen jener Zeit. Umständlich fand ich nur, dass man aus dem Text heraus das Inhaltsverzeichnis nicht direkt anwählen kann, sondern stets wieder über die Eröffnungsseite gehen muss.

Fast glaubt man, das physische Gewicht des kostbaren alten Buches zu spüren.

Adelheid Stahnke



ALLGEMEINBILDUNG

Brockhaus-Redaktion (Hg.)

Technologien für das 21. Jahrhundert

Brockhaus, Leipzig/Mannheim 2000. 704 Seiten, DM 98,–

Wer versucht, sich in ein Gebiet aus Wissenschaft oder Technik anhand eines Lexikons einzulesen, muss meist kapitulieren. Die Katz- und Mausjagd nach Querverweisen erschöpft eher, als dass sie belehrt. Erst recht, wenn sich ein Gebiet so rasant entwickelt wie die Gentechnik.



Der sechsbeinige Roboter (bisher nur als Prototyp vorhanden) mutet an wie ein Wesen aus einer fernen Welt.

Der fünfte Band der Brockhaus-Reihe „Mensch–Natur–Technik“ verspricht Abhilfe. Die Gratwanderung zwischen lexikalischem Anspruch und Lesbarkeit ist – wie bei den vorangegangenen Bänden („Vom Urknall zum Menschen“, siehe SdW 1/2000, S. 100, „Phänomen Mensch“, siehe SdW 8/2000, S. 112) – äußerst gelungen. Sieben Kapitel führen fundiert ein in Genetik, Lasertechnik, Energieversorgung, Neue Materialien, Miniaturisierung, Informationsverarbeitung und Raumfahrt.

„Schlüsseltechnologien“ heißt die thematische Klammer. Die einzelnen Kapitel verlieren dabei nie das „Wozu“ aus dem Blickfeld – also das Schloss, in das die Schlüsseltechnologien passen sollen.

Etwa im Kapitel „Gentechnik“. Eine knappe Hinführung spannt zunächst den Bogen von der Zuchtauswahl über Mendels Vererbungslehre bis hin zur „synthetischen Genetik“, in der sich Erbsubstanz nicht nur aus Material verschiedener Organismen kombinieren, sondern auch völlig neu herstellen lässt. Die Autoren – wie in den anderen Kapiteln ausgewiesene Experten auf dem jeweiligen Gebiet – erklären Erkenntnisse und Methoden von Genetik und Gentechnik verständlich, ohne auf die notwendigen Fachbegriffe zu verzichten.

Die drei folgenden Abschnitte sind den Anwendungen der Gentechnik gewidmet: Landwirtschaft und Novel Food, Pharmazie und Medizin, Wissenschaft und Forschung. Ein abschließender Essay diskutiert die Frage, wie weit Gentechnik gehen darf.

Auch die anderen Kapitel leisten eine solide Einführung ebenso wie den Anschluss an aktuelle Diskussionen. So wird im Abschnitt über Kernfusionsenergie nachvollziehbar, welche Vorteile ein funktionierender Fusionsreaktor hätte und wie schwierig seine Realisierung ist. Im Kapitel „Informationsverarbeitung“ wird die fast schon feuilletonistische Worthülse „Künstliche Intelligenz“ mit realistischen Inhalten und Erwartungen gefüllt.

Alles in allem ist der Brockhaus-Redaktion gemeinsam mit den Autoren ein kompaktes „Hausbuch der Schlüsseltechnologien“ gelungen, dessen Lektüre nicht nur deshalb Freude macht, weil man dabei solide Fakten erfährt, sondern auch, weil sie wichtige Einsichten vermittelt. Vielleicht ist die eine oder andere der gehaltvollen Grafiken ein bisschen klein ausgefallen, und vielleicht ist deswegen den Korrektoren der neckische Schreibfehler „Wärme-Konfektion“ statt „Konvektion“ in der Grafik auf Seite 623 entgangen; doch sind sie auch in dieser bescheidenen Größe noch instruktiv.

Alexander Pawlak

Der Rezensent ist Diplom-Physiker und freier Wissenschaftsjournalist in Marburg.



BIOLOGIE



Ernst Mayr

Das ist Biologie

Die Wissenschaft des Lebens

Aus dem Englischen von Jorunn Wißmann.
Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2000.
440 Seiten, DM 24,90

Dieses Buch kann man getrost als eine Synthese der Biologie des 20. Jahrhunderts bezeichnen. Ernst Mayr, der in drei Vierteln des 20. Jahrhunderts bedeutende biologische Arbeiten und Bücher veröffentlicht hat, zeigt hier mit überzeugenden Argumenten auf, dass – und wie – die Biologie eine eigenständige Wissenschaft ist. Trotz seines Umfanges bleibt es ein spannendes, lesbares und lesenswertes Gesamtwerk.

Im Vorwort und im ersten Kapitel „Was ist Leben?“ legt Mayr dar, worin sich die Gegenstände der Biologie von denen der anderen Naturwissenschaften grundlegend unterscheiden: in der hierarchischen Ordnung mit der jeder Hierarchiestufe eigenen Komplexität („Emergenz“) und dem genetischen Programm.

Mayr ist ein entschiedener Verfechter einer holistischen, organizistischen Biologie. Der Satz „Das Ganze ist mehr als die Summe der Teile“ sei nichts Mystisches, sondern laufe auf die Forderung nach Analyse und Untersuchung auf allen Ebenen hinaus – nur eben mit jeweils der betreffenden Ebene angepassten Methoden.

Im weiteren Verlauf des Werkes verteidigt Mayr seine Wissenschaft gegen herabsetzende Vorurteile: Die deskriptive Arbeit sei weder eigenständige Disziplin noch minderwertige Biologie, sondern die unverzichtbare Grundlage jeder biologischen Disziplin. Die Biologie sei keineswegs provinziell, sprich den Eigenheiten des Einzelfalls verhaftet, sondern ebenso wie die Physik allgemeingültig, eben überall dort, wo es Leben gibt. Die Biologie verfüge häufig nicht über das Experiment als letzte Bestätigung bestimmter Tatsachen? Auch andere Wissenschaften nutzen „natürliche Experimente“ wie Vulkanausbrüche, Sternbedeckungen oder die Ausbildung von Landbrücken zwischen Kontinenten. Die Gesetze der Biologie haben nicht die Allgemeingültigkeit physikalischer Gesetze? Doch, aber sie sind oftmals als Wahr-

scheinlichkeitsgesetze zu verstehen. Die Kluft zwischen Natur- und Geisteswissenschaften sei nicht unausweichlich, sofern eben nicht die Physik als allein richtungweisende Naturwissenschaft gilt.

In den nächsten drei Kapiteln geht es um die spezifisch biologischen Denkansätze und die Geschichte der Biologie. So wie Mayr sie darstellt, ist sie ein Triumph der Dialektik in dem Sinne, dass fast immer keines von zwei konkurrirenden Konzepten, sondern eine Synthese als beste Erklärung der Tatsachen letztendlich die Oberhand gewinnt. Die noch aktuelle Diskussion, ob Verhalten angeboren oder erworben sei, liefert dafür ein gutes Beispiel.

„Die Biologie ist so allgemeingültig wie die Physik“

Nach dieser Grundlegung schildert Mayr beispielhaft an vier Teilgebieten der Biologie – Systematik und Beherrschung der Vielfalt, Entwicklungsbiologie, Ökologie und Evolutionsbiologie – historische Entwicklung, frühere und derzeitige Erklärungsansätze, wichtige Begriffe und Teildisziplinen. Auf eine ausführliche Besprechung von Neurobiologie und Molekularbiologie verzichtet er, nicht weil diese Fachgebiete weniger bedeutend wären, sondern weil ihm dort die Fachkompetenz fehle.

In einzelnen Punkten kann man anderer Meinung sein. So erscheint mir die Besprechung der ökologischen Nische etwas zu knapp und zu nahe am klassischen „Planstellenkonzept“, auch wenn die vieldimensionalen Nutzungsräume erwähnt werden. Neben der Einteilung der Ökologie in eine solche von Individuum, Art und Gemeinschaft könnte man sich auch eine Gliederung in Ökophysiologie, Verhaltensökologie und Evolutionsökologie vorstellen. Im Kapitel „Evolution“ trennt Mayr nicht klar zwischen Evolutionstheorie und Rekonstruktion der Evolutionsgeschichte, womit er Kritikern der Evolutionsbiologie vermeidbare Angriffspunkte gibt. Bei der Frage, warum nicht alle evolvierten Merkmale die beste denkbare Lösung bieten, hätte er erwähnen sollen, dass häufig Merkmale nicht unabhängig voneinander variieren können: Ein nicht-optimales Merkmal kann sehr wohl Bestandteil eines insgesamt optimalen Kompromisses zwischen verschiedenen Anforderungen sein. Trotzdem sind diese Kapitel, sowie das anschließende über den evolutiven Werdegang des Menschen, ausgezeichnete Übersichten. ▶

Eine Bestellkarte finden Sie auf den Seiten 93/94.

Den letzten Teil des Buches bildet ein Kapitel über mögliche Standpunkte zu Ethik und Moral. Mayr fordert einen neuen evolutionären Humanismus und einen Moralkodex namens „Umweltethik“. Seine Ausführungen sind zwar sehr stark auf die Verhältnisse in der US-amerikanischen Gesellschaft abgestimmt, aber insgesamt keineswegs biologistisch im Sinne eines unzulässigen Reduktionismus. Manche Ideen über Sozialisationen als „offene Programme“, das heißt Vorgänge, deren Endzustand nicht im genetischen Programm festgelegt ist, und die Notwendigkeit vertiefter Ethik- und Moralunterweisung im frühen Kindesalter sind zweifellos kontrovers. Aber dem Autor ist zugute zu halten, dass er sich nicht um eine Stellungnahme drückt.

Ein Buch, das jedem zur Pflichtlektüre gemacht werden sollte, der sich mit dem Gedanken trägt, Biologie zu studieren oder Biologie in die heutige Gesellschaft hineinzutragen.

Udo Gansloßer

Der Rezensent ist Privatdozent am Institut für Zoologie der Universität Erlangen-Nürnberg.

ERKENNTNISTHEORIE

Rupert Riedl

Strukturen der Komplexität

Eine Morphologie des Erkennens und Erklärens

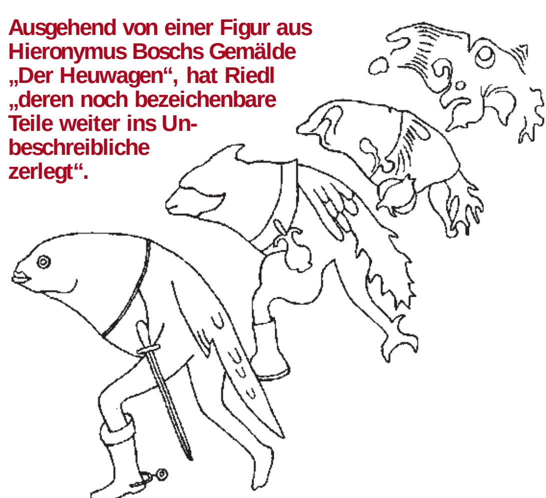
Springer, Berlin 2000. 381 Seiten, DM 79,–

Hätte Immanuel Kant die Zweckmäßigkeit als vor aller Erfahrung – *a priori* – gültiges Prinzip formuliert, wenn schon zu seiner Zeit Charles Darwin und/oder Alfred Wallace das Zweckhafte auf das Spiel von Variation und Selektion zurückgeführt hätten? Hätte Kant aufzuzeigen versucht, was die Vernunft vor aller Erfahrung zu leisten vermag, wenn Konrad Lorenz bereits den Erkenntnisapparat als Ergebnis stammesgeschichtlicher Anpassung beschrieben hätte? Hätte Goethe mit Begeisterung Schillern seine Urpflanze ans Herz zu legen versucht, wenn Rupert Riedl schon damals das Erkennen komplexer Gestalten zur unbewussten „ratiomorphen“ Leistung erklärt hätte?

Vielleicht war es besser, dass Goethe und Kant von solchen möglicherweise kränkenden Reduktionsbemühungen unbehelligt ihr Denken entwickelten. Konrad Lorenz und Rupert Riedl machen ja auch nicht „den ganzen Goethe“ oder „den ganzen Kant“ überflüssig; es gibt halt nur gewisse Parallelitäten mit den eigenen Ideen oder eine kleine gemeinsame „Schnittmenge“.

Wenden wir uns Rupert Riedl und dem „Ratiomorphen“ zu! Warum interpretieren wir in die erste Struktur im Bild rechts immerhin einen „Fischmenschen“, wogegen wir in den anderen Strukturen zunehmend weniger „Vernünftiges“ erkennen? Nach Rupert Riedl ist jenes Interpretationsvermögen eine Leistung unseres „ratiomorphen Apparates“, den uns die Evolution „installierte“. Dies Vermögen verhelfe auch in der Morphologie und Systematik zum Erkennen gesetzmäßig wiederkehrender Strukturen der Organismen. Das wundersame Erkennen von Strukturen, das im Alltag ebenso wie in der Wissenschaft stattfindet, ist für Riedl ein gerne unterschätzter Beitrag zum Verstehen der Welt. In seinen Augen wird zu oft und zu voreilig unter Verwendung vorgefasster Urteile „erklärt“.

Am Schluss seines Buchs hallt das Anliegen, das induktive, von der Anschauung ausgehende Vorgehen zu fördern, als Appell auch an die Bildungspolitik weiter. Riedl stellt den Unterschied zwischen Erklären und Erkennen besonders heraus, und beim Erkennen wiederum betont er den unbewusst verrechnenden und zuordnenden Anteil.



Ausgehend von einer Figur aus Hieronymus Boschs Gemälde „Der Heuwagen“, hat Riedl „deren noch bezeichenbare Teile weiter ins Unbeschreibliche zerlegt“.

Alles ist in den Rahmen der „EE“, der Evolutionären Erkenntnistheorie, gestellt, die Riedl, parallel mit Gerhard Vollmer, seit den siebziger Jahren vertritt. Konrad Lorenz, Kants zeitweiliger Nachfahre auf dem Königsberger Lehrstuhl, hatte als einer der ersten ab den vierziger Jahren die Kantschen „Apriori“ ins „rechte Licht“ der stammesgeschichtlichen Anpassung gesetzt. Riedl fand sogar eine entsprechende, weit frühere Bemerkung in Ernst Haeckels „Natürlicher Schöpfungsgeschichte“ von 1868: „Die wunderbare Fähigkeit zu Erkenntnissen *a priori* ist aber ursprünglich entstanden durch die Vererbung von Gehirnstrukturen, die bei den Vertebraten-Ahnen des Menschen langsam und stufenweise durch Anpassung an synthetische Verknüpfungen von Erfahrungen, von Kenntnissen *a posteriori* erworben wurden.“

Die evolutionär bewährten „angeborenen Lehrmeister“ (Konrad Lorenz) sorgen also bei komplexen Strukturen für Verstehen. Riedl sieht hier den Bezug zu Goethe, der hinter der Vielfalt von Erscheinungen eine diesen gemeinsame Gestalt erblickte. Mit solcher Abstützung im unerforschlich „Ratiomorphen“ (auch Lorenz verwendet diesen Terminus) ist den Naturwissenschaften ein Bescheidenheitsgebot auferlegt. Riedl scheut nicht die Nähe zum „hermeneutischen“ („verstehenden“) Verfahren in den Geisteswissenschaften.

Typisch für Riedl sind seine grafischen Darstellungen, anhand derer er eine reiche Begriffswelt entfaltet. Menschen reagieren offenbar verschieden auf Riedls Schreib- und „Malweise“. Ich persönlich habe mit seiner Technik gute Erfahrungen gemacht. Das Durcharbeiten dieser sich wiederholenden und erweiternden Grafiken lohnt sich, vor allem da es Riedl vielfach gelingt, sie mit griffigen, vor allem biologischen Beispielen zu verknüpfen.

Was Riedls Begriffswelt angeht: Es ist wohl schon so, dass sich die Organismen mit der bei ihnen waltenden „Teleonomie“ (Riedl übernimmt diesen Ausdruck für das Zweckhafte) gut eignen, ohne dogmatischen Anspruch eine systemtheoretische Terminologie zu entwickeln und zu erproben. In der System- ▶

theorie ist Riedl seinen Lehrern Ludwig von Bertalanffy und Paul Weiss verpflichtet.

Riedl baut auf seinen früheren, viel beachteten Büchern auf. Herrlich fulminant fand ich immer die „Strategie der Genesis“ (1976), auch damals schon mit kurzen Faust-Zitaten. Was hat nun dieses neue und späte Werk mehr? Es insistiert auf Respekt im Umgang mit Komplexität, baut die Evolutionäre Erkenntnistheorie aus, zieht Parallelen zu Kunst-, Geistes- und Sozialwissenschaften. Zwischenzeitliche bahnbrechende Ergebnisse der Erforschung der Genwirkungen sind einbezogen. Die Wirkungsweise der Gene ist natürlich auch das spannende Feld, auf dem sich entscheidet, was an den komplexen Strukturen der Organismen je verstanden werden wird. Riedl gibt hier illustrative Anregungen.

Der Autor betont das Konservative der genetischen Programme. Im Unterschied zu Produkten des Künstlers und anderen „Artefakten“ (Kunstwerken, Sprachen, Kathedralen), deren Programme im Gehirn liegen, sind die Genprogramme durch „Bürden“ der Vergangenheit in einer Weise eingeengt, dass Schimären wie Hieronymus Boschs Fischmensch strikt unmöglich sind. Es sei denn, sie würden durch moderne Gentechnik künstlich angestrebt. Aber man kann kaum erwarten, dass dies im Sinne Riedls wäre, seinen mahnenden Appell zu sorgsamem Umgang mit der Komplexität im Ohr.

Bruno Gauger

Der Rezensent ist promovierter Biologe und Lehrer für Biologie und Physik am Gymnasium Überlingen.

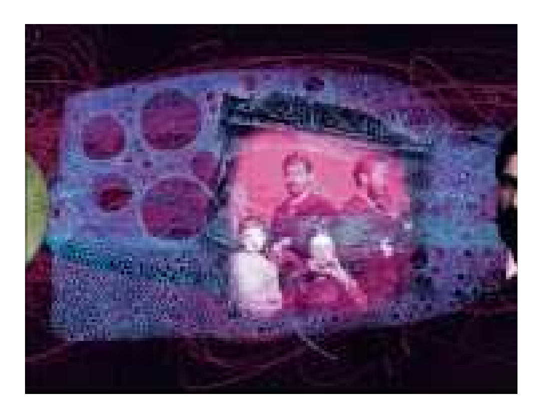


PSYCHOLOGIE

Sigmund Freud und die Geheimnisse der Seele

CD-Rom für Windows und Macintosh.
Navigo, München 2000. DM 69,90

An Literatur über Sigmund Freud und die Geheimnisse der Seele ist kein Mangel. Es gibt viele ebenso brauchbare wie preiswerte Einführungen in Leben und Werk des mythischen Gründervaters der Psychoanalyse; wozu dann noch diese CD-Rom? Die einzige halbwegs plausible Antwort ist der „Spaßfaktor“. In geradezu vorbildlicher Weise erfüllt dieses Werk jene soziale Norm des Lernens, die schon auf der Grundschule als verbindlich gilt: Nichts soll mehr daran erinnern, dass der Erwerb von Wissen und Kenntnissen mit Anstrengung verbunden ist. Von sphärischer Musik umgarnt und von bewegten



Aus dem Kapitel „Familienbilder“

Bildern gefesselt, tauchen wir ein in den „Erlebnispark Freud“.

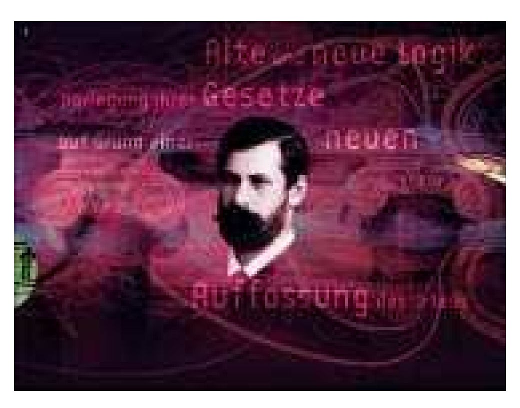
Nur liegt das Gros der Informationen als Text vor und muss auch unvermeidlich so dargeboten werden. Dieser Textteil erweist sich durchweg als absolut zuverlässig und auf der Höhe des heutigen Wissensstands. Allenfalls könnte man eine ungleichmäßige quantitative Gewichtung beklagen: Mancher Name aus dem Umfeld Freuds wird weit ausführlicher behandelt, als seiner Bedeutung entspricht, während andere zu knapp dargestellt sind. Aber das ist nebensächlich.

Wie aber findet man einen möglichst mühelosen Zugang zu Leben und Werk Freuds? Die Autoren haben sich für ein Verfahren entschieden, das dem Medium vermutlich am ehesten gerecht wird: Sie strukturieren das „Feld Freud“ – bekanntlich ein weites Feld – durch elf metaphorische Leitbegriffe, zum Beispiel „Coca“ für Freuds wissenschaftlichen Werdegang, „Wartezimmer“ für seelische Krankheit und psychoanalytische Heilung und „Moses“ für Freuds Verhältnis zur bildenden Kunst. Wer „Ring“ aufruft, erfährt alles über Freuds Schüler und Anhänger, über die Ausbreitung seiner Lehre, über Dissidenten und Abfallbewegungen und dergleichen mehr. Jedem Leitbild ist eine spezielle Bibliografie zugeordnet, ebenso eine Bild-Text-Animation.

Diese für das Medium spezifischen Ausdrucksmöglichkeiten werden ihrem Gegenstand durchaus gerecht, wo es um „Familienbilder“ oder insbesondere um „Film“ geht. In anderen Fällen, etwa bei der Darstellung der Freudschen Traumtheorie (Leitmetapher „Bellevue“), wirken sie eher bemüht, zum Teil sogar läppisch. Der Versuch, ein hoch abstraktes, nur in Worten angemessen formulierbares Thema multimedial und erlebnishaft aufzuarbeiten, muss im Absurden enden.

Diese CD-Rom lässt sich als Nachschlagewerk mit leicht herzustellenden Querbezügen nutzen. Die bequem zu erschließende Fülle des Materials ist beträchtlich und befriedigt jeden, der bestimmte Informationen abrufen will.

Was auf der Strecke bleibt, ist ein problematisierender Zugang zu Freud und seiner Schöpfung, der Psychoanalyse. Ein kleines Beispiel: Wenn wir unter



„Philosophie“ aus dem Kapitel „Coca“

dem Stichwort „Philosophie“ lesen, Freuds Verhältnis zu derselben sei ein Unverhältnis gewesen, so ist diese Information ohne Zweifel korrekt. Aber sie lässt nicht erkennen, dass dieses Unverhältnis höchst komplexer Natur war: Freud wahrte Distanz zur Philosophie, etwa zum Werk seines Zeitgenossen Friedrich Nietzsche, nicht zuletzt deshalb, weil er bei ihr Fragen formuliert und aufgehoben sah, die seinen eigenen bedenklich nahe kamen – es war eine Distanz aus Angst vor zu großer Nähe! Und erst an dieser Stelle wird die Geschichte von Freud und der Philosophie richtig spannend.

Hans-Martin Lohmann

Der Rezensent ist Autor von zwei Freud-Monografien und freier Publizist in Heidelberg.

Einladung zum Abonnement

Spektrum der Wissenschaft informiert monatlich über den aktuellen Stand von Naturwissenschaften, angewandter Forschung und Technologie. Auf hohem sachlichem Niveau, kompetent und authentisch – denn hier schreiben international renommierte Wissenschaftler selbst über ihre Arbeiten.

Nutzen Sie die Vorteile des Abonnements:

- Als Abonnent erhalten Sie Spektrum der Wissenschaft für monatlich DM 11,85; Schüler und Studenten ermäßigt für monatlich DM 10,30.
- Als **Dankeschön** erhalten Sie das Postkartenbuch „Astro-Galerie“.



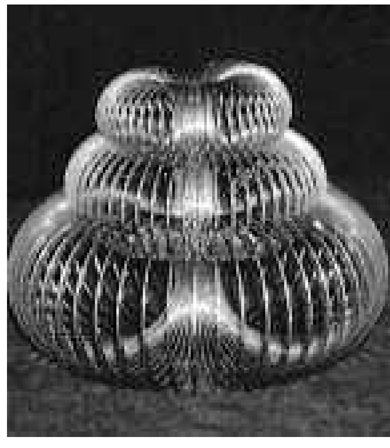
- Das **Online Archiv** hält für Abonnenten von Spektrum der Wissenschaft alle zurückliegenden Ausgaben seit 1993 im Volltext bereit.
- Außerdem haben Sie freien Zugang zu unserer **Linkdatenbank** mit über 11000 ausgesuchten Quellen im Internet.

Beginnen Sie Ihr Abonnement mit der nächsten Ausgabe und senden Sie nebenstehende Bestellkarte an uns ab.

Wir möchten auch Ihre Freunde für uns gewinnen

Als Abonnent von Spektrum der Wissenschaft können Sie aus eigener Erfahrung am besten beurteilen, wie wichtig es ist, kompetent, umfassend und authentisch informiert zu sein. Es wird Ihnen daher sicher nicht schwer fallen, unter Ihren Freunden und Bekannten einen neuen Spektrum-Abonnenten zu finden.

Als Dank für Ihre Empfehlung erhalten Sie wahlweise eine der abgebildeten Prämien.



Dreifach-Torus
Der Torus („Autoschlauch“) ist ein Lieblingsspielzeug der Topologen, aber diese drei Tori in verschiedenen Größen bieten viel mehr. Aus schraubenförmig gedrehten Metallbändern gewickelt, können sie einander durchdringen – und auseinander hervorspringen. Ein ergiebiges Spielzeug für Erwachsenenfinger.



Geschichte der Biologie
Dieses Buch ist eine einzigartige Informationsquelle zur Biologie von der Antike über Altertum, Mittelalter und Neuzeit bis zu den modernen Arbeitsrichtungen der Gegenwart. Es berichtet von 35 000 Jahren alten Tierabbildungen auf Höhlenwänden bis hin zu den neuesten Methoden der Erbgutanalyse. Eine Standardwerk über die Geschichte der Biologie.

Der Plasmiumgriff des **Design-Bleistift Sensa** läßt sich durch den Fingerdruck verformen und ermöglicht Ihnen eine individuell optimale Schreibhaltung; 0,7 mm Mine.

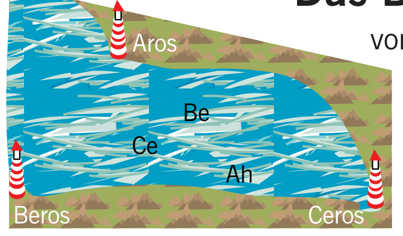


Multi-Klappwerkzeug:
Edelstahl mattsilber, mit 12 Bits

Weltbilder entstehen im Kopf

Das Bermuda-Dreieck

von Reinhard Schmidt



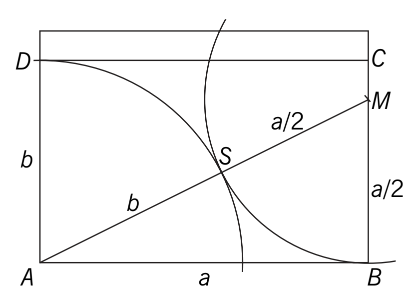
Das Bermuda-Dreieck liegt zwischen den Leuchttürmen von Aros, Beros und Ceros; über seine Form ist sonst nichts bekannt. Vor langer Zeit ist das Dreieckige Land mit den Leuchtfeuern von Ah, Be, und Ce versunken. In alten Logbüchern steht, dass Ah auf der halben Strecke von Ceros nach Ce, Be auf der halben Strecke von Aros nach Ah und Ce auf der halben Strecke von Beros nach Be lag.

Finden Sie diese verschollenen Leuchttürme mit Zirkel und Lineal.

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D–69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir zehn Armbanduhren „Komet“. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 13. Februar 2001, eingehen.

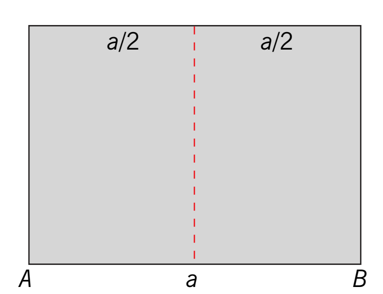
Lösung zu „Gold falten“ (Dezember 2000)



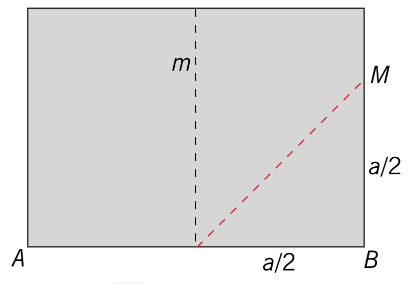
Das Verhältnis des Goldenen Schnitts, $a/b = (\sqrt{5}+1)/2$, lässt sich durch die oben skizzierte Konstruktion auf einem Din-A4-Blatt realisieren.

Hans Pfister aus Hamburg machte diese Konstruktion zur Grundlage seiner Faltung; es gibt weitere Möglichkeiten. In den folgenden Zeichnungen sind der zuletzt entstandene Falz sowie die Rückseite des Blattes rot markiert.

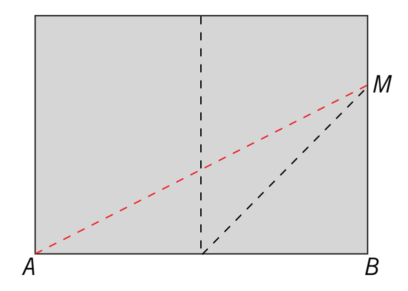
Zuerst ist der Punkt *M* zu finden. Dazu bestimmt man zunächst die Mittellinie *m*, indem man *B* auf *A* faltet,



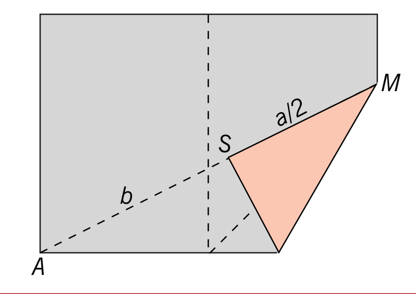
und überträgt dann die Länge *a*/2 auf die rechte Seite, indem man die rechte Hälfte von $\overline{AB}$ auf *m* faltet.

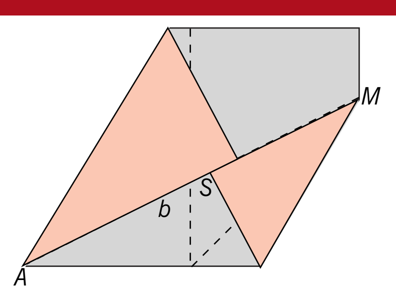


Nun wird $\overline{MA}$ markiert:

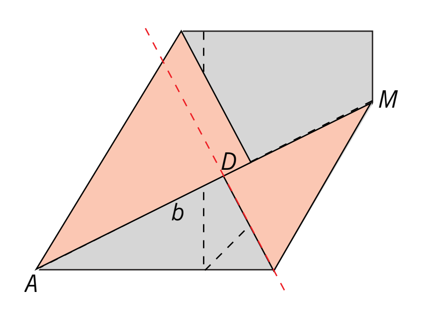


Faltet man $\overline{MB}$ auf diese Strecke, so erhält man *S*. Damit ist *b* bestimmt und muss noch auf die linke Kante des Din-A4-Blattes übertragen werden.

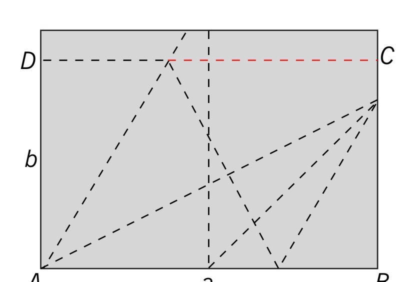




Dazu faltet man die linke Seite des Blattes auf $\overline{AM}$ und erhält *D*.
Nun faltet man entlang der roten Linie, was bereits einen Teil der Strecke $\overline{CD}$ durch einen Falz markiert.



Das Blatt kann nun wieder aufgefaltet und der bereits begonnene Falz $\overline{CD}$ durch Nachfalten verlängert werden. Alles bügeln – fertig!



Hans Schick aus Rotenburg schlägt eine Näherungslösung vor, die in der Praxis wahrscheinlich genauer ausfällt als die beschriebene exakte. Das Din-A4-Blatt hat das Seitenverhältnis *a*/*b* $=\sqrt{2}/1$. Markiert man durch drei Halbierungen ein Achtel der kurzen Seite und klappt es um, so ergibt sich das Verhältnis $a/b = 8\sqrt{2}/7 = 1{,}6162$, was etwa ein Tausendstel kleiner ist als der geforderte Wert 1,6180.

Die Gewinner der sechs Spiele „Tumicarona“ sind Gerhard Krülle, Aidlingen; Norbert Weichert, Ettlingen; Ilona Frey, Wiesbaden; Tobias Gonser, Bonn; Heinrich Biener, Weilheim; und Wolfgang Uhlendorf, Düsseldorf.

Lust auf noch mehr Rätsel? Auf der Website von Spektrum der Wissenschaft (www.spektrum.de) finden Sie jeden Monat in der Rubrik „Rätsel“ eine neue mathematische Knobelei.



Grafik: Axel Weigend

Die Lichtmühle

Ist es das Licht, das die vier Flügel so unermüdlich rotieren lässt? Nicht direkt – entscheidend ist ein kleiner Unterschied in der Stoßkraft der Luftmoleküle.

VON WOLFGANG BÜRGER

Die neue Rubrik „Physikalische Unterhaltungen“ erscheint künftig an dieser Stelle im Wechsel mit den „Mathematischen Unterhaltungen“.

Auf den ersten Blick ähnelt sie einer aufrecht stehenden Glühbirne, die „Lichtmühle“, aber zu leuchten ist nicht ihre Aufgabe. Im Sonnenlicht oder im Schein einer Rotlichtlampe dreht sich in ihrem Innern ein leichtes Flügelrad mit einer gläsernen Pfanne als Lager auf einer Nadelspitze. Die vier Flügel des Rotors sind quadratische Scheiben aus Glimmer oder Aluminium, die auf ihrer Vorderseite – in Laufrichtung – weiß und auf der Rückseite schwarz gefärbt sind. Sie treiben das Rad umso schneller, je heller sie bestrahlt werden: ein Strahlungsmotor. Lässt sich damit die Intensität von Strahlung messen? Im Prinzip ja; die Lichtmühle leitet sich von einem genauen und empfindlichen Strahlungsmesser ab, und dieser Bedeutung verdankt sie ihren zweiten Namen: Radiometer. Aber die Strahlung wirkt durch einen komplizierten Mechanismus, und die Frage nach dieser Wirkungsweise hat mehrere Jahrzehnte lang namhaften Physikern, unter ihnen James Clerk Maxwell und Albert Einstein, Rätsel aufgegeben.

Die Vorgeschichte begann mit dem Physiker und Ingenieur Augustin Jean Fresnel (1788–1827), der in der Öffentlichkeit weniger durch seinen optischen Interferenzversuch zum Nachweis der Wellennatur des Lichts als durch die Erfindung der Zonenlinsen bekannt geworden ist, die seinen Namen tragen. Die großen, flachen Glaslinsen bündeln seit über einem Jahrhundert in aller Welt den Schein der Leuchttürme. Fresnel entdeckte die Radiometerkraft 1825. Mit der Physik seiner Zeit konnte er ihren Grund nicht verstehen, aber durch Versuche bei verschiedenen Drücken einige denkbare Erklärungen ausschließen: Was das Flügelrad zum Drehen bringt, ist weder eine raumerfüllende Gasströmung noch verdampfendes Material aus den beheizten Oberflächen.

Selbst für Maxwell und Einstein war die Lichtmühle lange ein Rätsel

Der Erfinder des Spielzeugs ist William Crookes (1832–1919), ein Privatgelehrter und außergewöhnlich erfolgreicher Experimentator. Er war seit 1863 Fellow der Royal Society of London und ab 1913 ihr Präsident. 1861 hatte er das chemische Element Thallium mit der Ordnungszahl 81 durch seine grüne Linie im Spektrum gefunden. Als er zwölf Jahre später damit beschäftigt war, das Atomgewicht des neuen Elements zu bestimmen und dazu mit einer Vakuum-Waage Substanzproben von höherer als der Temperatur der Umgebung abwog, bemerkte er, dass die Hitze die Gravitationskraft zu vermindern schien. Er hatte die Radiometerkraft wiederentdeckt. Im historischen Teil seiner wissenschaftlichen Arbeit von 1873 bezog er sich auf Fresnel, deutete die Kraft aber als eine rätselhafte Anziehung oder Abstoßung durch Wärme.

Ein Effekt des Lichtdrucks? Was verursacht die Radiometerkraft? Ist es der Strahlungsdruck des Lichtes, dessen Existenz Maxwell in einer ebenfalls 1873 veröffentlichten Arbeit aus den Differenzialgleichungen des elektromagnetischen Feldes folgerte? Wenn wir der Einfachheit halber annehmen, dass die hellen Vorderseiten der Radiometerflügel die einfallende Strahlung wie vollkommene Spiegel reflektieren, während die dunklen Rückseiten sie vollständig absorbieren, müsste die Strahlung nach dem Impulserhaltungssatz auf die weißen Seiten einen genau doppelt so großen Druck ausüben wie auf die schwarzen, der Lichtdruck das Flügelrad daher andersherum drehen als in den käuflichen Radiometern. Außerdem ist die Druckkraft der Sonnenstrahlen viel zu klein, um die Reibung im Nadellager zu überwinden. Diese Reibung ist erheblich, wie man leicht nachprüfen kann: Man lässt die ganze Lichtmühle in der Hand horizontal kreisen und stellt fest, dass – nur durch Reibung im Lager vermittelt – das Flügelrad mühelos auf hohe Drehzahlen kommt.

Gleichwohl sind inverse Radiometer, die vom Lichtdruck angetrieben werden, vielfach realisiert worden. Sie laufen aber erst, wenn das Gas aus dem Glaskolben nahezu restlos entfernt ist, bei Hochvakua von höchstens 10^{-7} Millibar Druck. Und ihr Flügelrad wird, statt auf einer Nadelspitze zu liegen, leicht drehbar an einem langen, dünnen Torsionsfaden aufgehängt.

Das Experimentum crucis: Der Strahlungsdruck des Lichtes wirkt als eine Kraft von außen auf die Flügel der Lichtmühle, ähnlich wie der Wind auf die Segel eines Segelschiffs. Würde das Flügel-

rad vom Lichtdruck angetrieben, sollte es den Glaskolben durch die Reibung im Lager in der gleichen Drehrichtung mitziehen, vorausgesetzt, dieser könnte sich frei bewegen. Erwärmt das Licht dagegen nur die Flügel, liefert also nur Energie zum Antrieb, ohne selbst mit nennenswerter Kraft auf die Flügel zu drücken, kann das Flügelrad nur in Drehung kommen, wenn es sich vom Gehäuse abstößt. Dann müsste es ein Rückstoßmoment geben, das den Glaskolben in die entgegengesetzte Richtung zu drehen bestrebt ist.

Arthur Schuster, ein Mitarbeiter des bedeutenden Hydrodynamikers Osborne Reynolds (nach dem die Reynolds-Zahl benannt ist) in Manchester, führte 1876 das entscheidende Experiment mit einem frei drehbar aufgehängten Radiometer durch. Flügelrad und Glaskolben drehten sich bei Bestrahlung in verschiedene Richtungen. Also ist es nicht der Lichtdruck, der das Rad antreibt, sondern ein innerer Mechanismus des Radiometers.

Die Molekülströmung: Am einfachsten ist die Theorie, wenn man die mittlere freie Weglänge der Moleküle so groß annimmt, dass man Wechselwirkungen der Luftmoleküle untereinander vernachlässigen kann. Das ist bei einem Druck von höchstens 10^{-3} bis 10^{-2} Millibar der Fall. Die Luftmoleküle prasseln bei ihrer Wärmebewegung von beiden Seiten auf den Flügel. Sie verlassen aber die heißere schwarze Seite im Mittel mit höherer Geschwindigkeit und erteilen ihr dabei eine geringfügig höhere Rückstoßkraft. Diese Differenz der Stoßkräfte setzt das Flügelrad in Bewegung, und zwar mit der weißen Seite voraus.

Martin Knudsen (1871–1949), lange Jahre theoretischer Physiker in Kopenhagen, hat aus diesen Überlegungen eine Formel für seinen Strahlungsmesser theoretisch hergeleitet (siehe Kasten auf der nächsten Seite): Die Radiometerkraft pro Flächeneinheit eines Flügels ist dem Gasdruck proportional und hängt außerdem nur vom Verhältnis der Temperaturen von schwarzer Flügelfläche und Umgebung ab. Diese Formel gilt allerdings nur bei niedrigeren Drücken, als sie in käuflichen Lichtmühlen vorliegen.

Erhöht man den Gasdruck im Kolben über die 10^{-2} Millibar hinaus, bei denen noch freie Molekülströmung herrscht, steigt auch die Radiometerkraft zunächst stark an und erreicht ihre größten Werte bei Drücken, die zehn- bis hundertmal größer sind. Solche Drücke herrschen vermutlich in den käuflichen Lichtmühlen (die Hersteller machen darüber keine Angaben). Der Radiometereffekt wird durch Moleküle verstärkt, die über den Rand der Flügel von der kälteren zur wärmeren Seite wandern („thermisches Kriechen"). Mehr und mehr wird die Radiometerkraft an den Flügelrändern aufgebracht, was schon Reynolds und Maxwell bemerkten und was Gaskinetiker bis in die jüngste Zeit beschäftigt.

Unter gleich bleibenden äußeren Bedingungen stellt sich auf die Dauer eine konstante Rotationsgeschwindigkeit ein. Offensichtlich ist es die Geschwindigkeit, bei der die Radiometerkraft mit der Reibungskraft im Nadellager im Gleichgewicht ist.



Unter Lichteinstrahlung drehen sich die Flügel der Lichtmühle unermüdlich – mit der hellen Seite voraus.

WOLFGANG BÜRGER

Rückdrehungen werden auch in gängigen Radiometern beobachtet. Offensichtlich kann die Temperatur der schwarzen Flächen unter die Umgebungstemperatur sinken. Ohne die Temperaturen im Innern des Radiometers zu messen, kann man allerdings nur aus den Beschleunigungen des Flügelrads auf die wirkenden Drehmomente und von diesen auf die Temperaturen der Flügel zurückschließen. Damit sich das Flügelrad wenigstens kurze Zeit im entgegengesetzten Sinn dreht, befördert man das laufende Radiometer an einen schattigen Ort, wo es sich durch Ausstrahlung abkühlen kann, und bringt das Flügelrad zugleich durch vorsichtige Gegenbewegung mit Hilfe der Reibung im Lager zum Stehen. Überraschend setzt es sich aus der Ruhe von selbst wieder in Bewegung und dreht sich einige Sekunden lang in Gegenrichtung. Also muss vorübergehend ein rücktreibendes Drehmoment gewirkt haben. Da sich die dunklen Flächen durch Strahlung rascher erwärmen, kühlen sie sich auch durch Strahlung schneller ab, offenbar bis unter die Umgebungstemperatur. Einige Autoren haben über minutenlange Rückdrehungen von Lichtmühlen im ▶

Wolfgang Bürger *ist Physiker und Professor an der Universität Karlsruhe. Seine besondere Neugier gilt physikalischen Spielzeugen.*

Die Radiometerkraft

Bilanz der Molekülstöße

Martin Knudsen studierte die Radiometerkraft in einem sehr schmalen Spalt zwischen zwei fest montierten Platten, von denen er die eine auf die Temperatur T_1 aufheizte und die andere auf der Umgebungstemperatur T_2 hielt. Dort hinein brachte er eine bewegliche Platte der Temperatur T_2, die den Radiometerflügel vertritt. Welche Kraft übt die Molekülströmung auf sie aus? Vereinfachend sieht man von der Geschwindigkeitsverteilung der Moleküle ab und tut so, als hätten alle Teilchen dieselbe, ihrer Temperatur T entsprechende, Geschwindigkeit v. In diesem Falle sind die (absolute) Temperatur T und der Druck p proportional der kinetischen Energie $mv^2/2$ der Moleküle und daher proportional dem Quadrat der Geschwindigkeit. Für den Druck gilt $p = nmv^2/3$ und für die Temperatur $T = mv^2/(3k)$. Dabei ist m die Masse eines Teilchens, n die Teilchenzahldichte, k die Boltzmann-Konstante; v bedeutet von jetzt an die Geschwindigkeit senkrecht zu den Platten, und der Faktor 1/3 trägt der Richtungsverteilung der Geschwindigkeit Rechnung.

Zwischen den Platten auf gleicher Temperatur T_2 gibt es in der Volumeneinheit n_2 Teilchen, die mit der Geschwindigkeit v_2 von der einen zur anderen Platte fliegen, und ebenso viele, die ihnen mit der gleichen Geschwindigkeit entgegenkommen. Die Teilchenzahldichte pro Volumeneinheit ist daher $n = 2n_2$. Im Zwischenraum zwischen den Platten mit unterschiedlichen Temperaturen T_1 und T_2 findet man in der Volumeneinheit n_1 Teilchen, die mit der Geschwindigkeit v_1 auf die bewegliche Platte zufliegen, und n_2 Teilchen mit der Geschwindigkeit v_2 in Gegenrichtung. Dabei wird die geringe Geschwindigkeit der Platte (bzw. der Flügel in der Lichtmühle) gegen die Teilchengeschwindigkeit vernachlässigt. Wenn sich die Teilchen nicht an einer der Platten anhäufen sollen, müssen in einer Zeiteinheit ebenso viele Teilchen den kompletten Hinweg wie den kompletten Rückweg zurücklegen: $n_1 v_1 = n_2 v_2$. Falls $v_1 > v_2$ ist, muss also $n_1 < n_2$ sein – wie im Zugverkehr: Fahren die Bahnen schneller, können weniger Züge auf der Strecke die gleiche Personenzahl befördern; dazu fahren sie allerdings häufiger hin und her. Auf die (schwarze) Nicht-Gleichgewichtsseite des beweglichen Flügels üben die absorbierten und die emittierten Teilchen gemeinsam den Druck

$$p_1 + p_2 = \frac{mn_1 v_1^2}{3} + \frac{mn_2 v_2^2}{3} = \frac{mnv_2^2}{6}\left(\frac{v_1}{v_2} + 1\right)$$

aus, während auf seiner Gleichgewichtsseite der Druck

$$p = 2p_2 = \frac{mnv_2^2}{3}$$

herrscht. Die Differenz $\Delta p = p_1 - p_2$ beider Drücke treibt den Flügel; die zugehörige Radiometerkraft ist gleich Δp mal der Flügelfläche. Drückt man Δp durch den Druck p im Inneren des Radiometers und die beiden Temperaturen T_1 und T_2 aus, erhält man

$$\Delta p = \frac{p}{2}\left(\sqrt{\frac{T_1}{T_2}} - 1\right).$$

Bei kleinem Temperaturunterschied $\Delta T = T_1 - T_2 \ll T_2$ ist die Druckdifferenz näherungsweise gleich $p\Delta T/(4T_2)$. Für die typischen Werte $T_2 = 300$ Kelvin und $\Delta T = 12$ Kelvin ergibt sich $\Delta p = p/100$.

Verglichen mit der oben berechneten Wirkung des Temperaturunterschiedes ist die direkte Wirkung des Lichtdrucks winzig klein: Beim Sonnenbaden nimmt man den Druck der Sonnenstrahlung nicht als Last wahr. Ein genaues Verhältnis der beiden Kräfte lässt sich nicht angeben, weil der gaskinetische und der Strahlungsdruck in unterschiedlicher Weise von der Intensität der Strahlung abhängen. Zur Veranschaulichung des Strahlungsdrucks wähle ich deshalb einen anderen Vergleich.

Das große Solarsegel eines Raumschiffs, das am Rand der Erdatmosphäre im Sonnenlicht segelt, sollte eine messbare Kraft von der Sonne erfahren. Welche Fläche müsste das Segel haben, damit der Lichtdruck der Sonnenstrahlung ihm einen Schub von 10 Newton (rund „ein Kilo") erteilt?

Elektromagnetische Strahlung der Intensität S übt auf eine Fläche senkrecht zur Einfallsrichtung den Druck (Kraft pro Fläche)

$$p_s = \frac{S}{c}(1 + r)$$

aus (das Reflexionsvermögen r der Fläche liegt zwischen 0 und 1; c ist die Lichtgeschwindigkeit). Die Sonne strahlt mit einer Intensität $S = 8$ Joule pro Minute und Quadratzentimeter (die so genannte Solarkonstante), die Lichtgeschwindigkeit ist $c = 3 \times 10^8$ Meter pro Sekunde. Wenn das Solarsegel ein idealer Reflektor ist ($r = 1$), folgt für den Strahlungsdruck $p_s = 2S/c \approx 0,9 \times 10^5$ Newton pro Quadratmeter. Für den Schub von 10 Newton braucht man ein Segel von über einem Quadratkilometer Fläche: $A = 1,125\ \text{km}^2$.

Gefrierfach eines Kühlschranks oder unter der Wirkung von Kältespray berichtet, die ich an meinen Lichtmühlen nicht bestätigen kann.

In Experimentierbüchern für die Jugend findet sich eine Anleitung zum Selbstbau einer „Lichtmühle". Man klebe ein Flügelrad aus Aluminium-Haushaltsfolie zusammen und hänge es an einem dünnen und doch monatelang haltbaren Faden aus festgewordenem UHU-Kleber auf. Im Schein einer Rotlichtlampe dreht es sich bei Atmosphärendruck etwas unvorhersehbar mal in die eine und mal in die andere Richtung. Es bringt wenig, die Flügel einseitig zu schwärzen. Der Wirkungsgrad lässt sich aber wesentlich verbessern, wenn man die Flügel schräg stellt wie die Flügel einer erzgebirgischen Weihnachtspyramide. Dadurch wird nahe gelegt, dass diese „Lichtmühle" in Wirklichkeit eine thermische Aufwind-Turbine ist, die ihren Antrieb aufsteigender Warmluft verdankt. In der Tat würden echte Radiometer auch bei so genannter „Schwerelosigkeit" in einem „Spacelab" arbeiten, während dieser Typ „Lichtmühle" dort den Dienst verweigert.

Hydraulische Bremsen

Bis in die dreißiger Jahre basierten Bremssysteme auf der Kraft, die vom Fahrer mit dem Fuß auf das Bremspedal übertragen wurde. Über Seilzug oder Gestänge wirkte sie auf die Bremsbacken, die gegen die Bremstrommel gedrückt wurden und so die Geschwindigkeit des Fahrzeugs verringerten.

Hydraulische Systeme hingegen übertragen den Druck mit Hilfe einer Flüssigkeit und erreichen auf diese Weise größere und gleichmäßigere Bremskräfte. Bei Betätigung des Pedals wird der Kolben des Hauptbremszylinders verschoben. Das wandelt die ausgeübte Kraft in Druck um, der über die Bremsleitungen zu den Kolben der Radbremszylinder übertragen wird; diese betätigen die eigentlichen Trommel- oder Scheibenbremsen. Weil die Fläche der Radbremszylinder größer ist als die des Hauptbremszylinders, wird die vom Fahrer mit dem Fuß ausgeübte Kraft verstärkt.

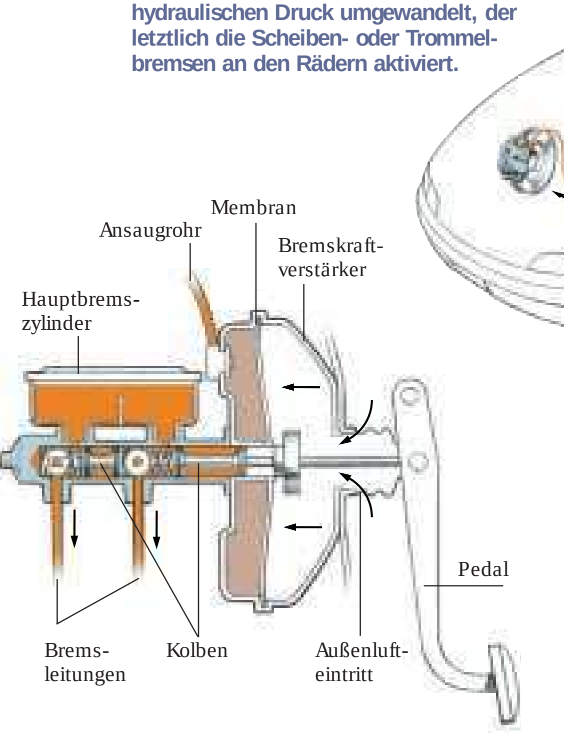
In den fünfziger Jahren erleichterte die Erfindung des Bremskraftverstärkers das Autofahren noch mehr, da er den Bremsdruck weiter erhöht, also noch weniger Fußkraft abverlangt. Zur Sicherheit sind moderne Bremsanlagen in mindestens zwei Kreise geteilt, zu denen je ein sich diagonal gegenüberliegendes Vorder- und Hinterrad gehört. Auch bei Ausfall eines Bremskreises kann der Fahrer das Fahrzeug also gefahrlos zum Stehen bringen. ■

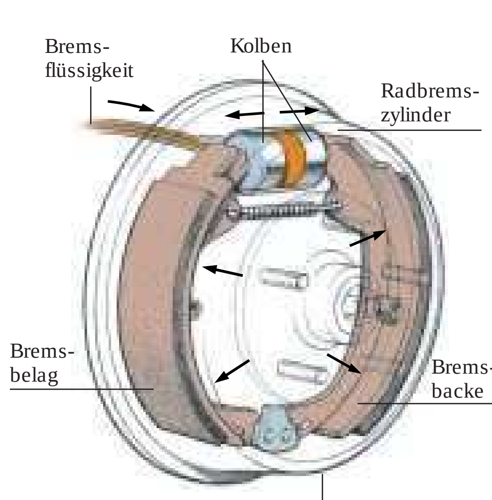
Stanley L. Stokes ist Mitglied der amerikanischen Society of Automotive Engineers. *Wir danken der Saab Deutschland GmbH und dem Fachbereich für Mechatronik der FH Karlsruhe für fachliche Unterstützung.*

Beim Treten des Pedals wird die auf den Hauptbremszylinder einwirkende Kraft in hydraulischen Druck umgewandelt, der letztlich die Scheiben- oder Trommelbremsen an den Rädern aktiviert.

GEORGE RETSECK

Eine Servobremse ist mit einem Bremskraftverstärker ausgerüstet, der mit dem Hauptbremszylinder eine Baugruppe bildet. In der Ruheposition des Bremspedals umgibt Unterdruck beidseitig die mit dem Arbeitskolben verbundene Membran. Wird das Pedal betätigt, so öffnet sich auf der einen Seite der Membran ein Ventil, durch das Luft einströmt. Der große Druckunterschied drängt die Membran und mit ihr den Arbeitskolben voran, der dann den Kolben des Hauptbremszylinders betätigt. Je größer die Membranfläche, desto ausgeprägter die Verstärkung.

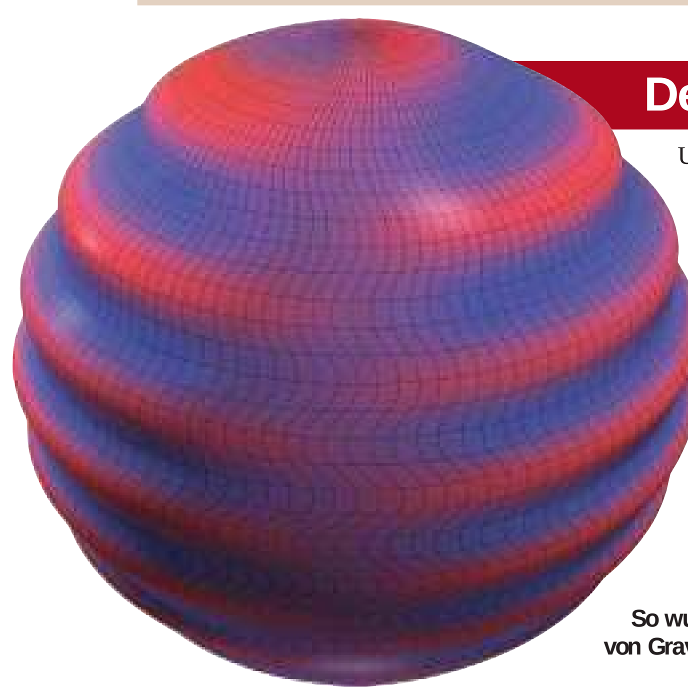




Kolben
Bremsbacke
Brems-scheibe
Brems-flüssigkeit
Sattel

Scheibenbremsen werden meist für Vorderräder verwendet, um die beim Bremsen freiwerdende Reibungshitze schnell abzuführen (die Scheiben haben direkten Luftkontakt). Durch die Bewegung der Kolben des Bremssattels werden die Backenbeläge gegen eine Metallscheibe gepresst. Die Reibung verlangsamt nun deren Drehgeschwindigkeit und somit das Rad.

Trommelbremsen kosten weniger, leisten aber auch nicht so viel wie Scheibenbremsen. Sie werden deshalb gelegentlich für Hinterrad- oder Handbremsen verwendet. Zwischen den beweglichen Enden zweier Bremsbacken ist ihr Zylinder montiert. Bei Betätigung des Pedals werden die Backen durch die beiden Zylinderkolben gegen die Bremstrommel gepresst, die Bremsbeläge bremsen das Rad durch Reibung ab. Auf Grund ihrer größeren Fläche arbeiten Scheibenbremsen wirksamer.



Der neue Kosmos

Unser kosmologisches Weltbild verändert sich rasanter denn je. Beobachtungen mit neuen Satelliten und irdischen Superteleskopen unterziehen die Theorie des inflationären Universums dem Härtetest des Vergleichs mit der Realität. Die Kosmologen stehen kurz davor, das Rätsel der kosmischen Beschleunigung aufzuklären – und damit vielleicht sogar die Frage, wieso überhaupt Leben entstehen konnte.

So wurde das junge Universum von Gravitationswellen deformiert.

Warum der Geist schwindet

Gedächtnis, Persönlichkeit, Würde – die Alzheimer-Krankheit raubt alles. Millionen Menschen steht dies bevor. Wie kann Forschung sie davor bewahren?



Petra, Metropole am Rande der Wüste

Wer waren die Nabatäer, die jahrhundertelang den Weihrauchhandel von Petra aus kontrollierten? Antike Schriften und archäologische Befunde, neu interpretiert, zeichnen ein schillerndes Bild dieses arabischen Stammes.



Gene, Muskeln und Sport

Auch das beste Training verhilft nicht zum Sprung in die Weltelite, wenn die individuellen natürlichen Voraussetzungen nicht stimmen. Werden einst gentechnisch aufgerüstete Superathleten in die Wettkämpfe gehen?



Technoskop-Report: Digitale Filmtechnik

Ob Spielfilm oder Werbespot – ohne Digitaltechnik geht heute nichts mehr. Sie erleichtert den kreativen Prozess und bietet erhebliches Einsparpotenzial. Der neueste Trend: Digitaltechnik von der Aufnahme bis zur Aufführung. Noch benötigen die meisten Kinos herkömmliches Zelluloid, doch in einigen Jahren könnten sie Filme als Bits und Bytes per Satellit oder DVD beziehen.

Weitere Themen im März

Ichthyosaurier – Herrscher der Meere im Jura

Was Dinosaurier zu Land, waren Ichthyosaurier im Ozean. Erst jetzt können Wissenschaftler ihre Vorherrschaft erklären.

Das Proton unter dem Hera-Mikroskop

Am Speicherring Hera in Hamburg nehmen Teilchenphysiker die fundamentalen Kräfte innerhalb des Wasserstoffkerns unter die Lupe und untersuchen dessen Struktur.

